



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ PRO VÝROBU PROTOTYPOVÉ FORMY

APPLICATION OF MODERN TECHNOLOGIES TO PRODUCTION OF PROTOTYPE FORM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. arch. Josef Pospíšil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Ing. arch. Josef Pospíšil**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aplikace moderních technologií pro výrobu prototypové formy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V práci bude řešen návrh prototypového dílu s následnou konstrukcí formy pro jeho výrobu za pomoci moderních metod a technologií. Vyrobená forma a prototypový díl budou digitalizovány pomocí optického skeneru Atos a porovnány s originálním návrhem. Práce bude ukončena technicko–ekonomickým zhodnocením aplikovaných moderních technologií použitých pro výrobu prototypové formy, která bude určena pro výrobu nulté série dílů (ověření funkčnosti a technických parametrů).

Cíle diplomové práce:

1. Popis, rozbor a charakteristika aplikovaných moderních technologií.
2. Návrh designu, konstrukce a tvaru prototypového dílu a formy.
3. Výroba prototypového dílu a formy pomocí aditivní technologie Rapid Prototyping.
4. 3D digitalizace prototypového dílu a formy – zpracování získaných dat.
5. Zhodnocení získaných dat – porovnání s originálem (tvorba měřicího protokolu).
6. Technicko–ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

RAJA, V., FERNANDES, K. Reverse Engineering. Vyd. Springer, 2008, 242 s. ISBN 978-1-846-8-856-2.

GIBSON, I., ROSEN, D., STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Vyd. Springer, 2015, 487 s. ISBN 978-1-4939-2112-6.

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-2-4-4025-8.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá využitím moderních technologií jako je např. 3D skenování, 3D tisk a vakuové lití na produkci prototypové formy, jejich výhodami a nedostatky oproti konvenčním způsobům výroby. Součástí je úvaha nad ekonomickým přínosem aplikace těchto technologií a vyhodnocení vhodného způsobu výroby zamýšleného produktu.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, 3D skenování, 3D model, vstřikování plastů, vakuové lití, prototypová výroba, prototyp, reverzní inženýrství, termoplasty, polymery, aditivní výroba.

ABSTRACT

This Diploma Thesis deals with modern technologies such as 3D scanning, rapid prototyping and vacuum casting to production of prototype form. It considers advantages and disadvantages of the modern technologies compared to traditional process of manufacturing prototype form and economical contribution using the modern technologies. Part of the thesis considers a choice of suitable manufacturing technology of a particular product.

KEYWORDS

Rapid prototyping, 3D scanning, 3D model, injection moulding, vacuum casting, prototype manufacturing, reverse engineering, thermoplastic, polymers, additive manufacturing.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POSPÍŠIL, J. *Aplikace moderních technologií pro výrobu prototypové formy*
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 116 s.
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Josefa Sedláka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2017

.....

Josef Pospíšil

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, jeho cenné náměty, velkou vstřícnost a pozitivní přístup. Touto formou bych rovněž chtěl poděkovat vedení společnosti MCAE systems s.r.o. za poskytnutí vybavení a prostor potřebných pro splnění záměru této práce a v neposlední řadě děkuji vedení společnosti FGR Factory s.r.o. za udělení souhlasu práce na inovativním řešení designu tachometru a světla motocyklu Midalu.

OBSAH

ABSTRAKT	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
ÚVOD	10
1 POPIS, ROZBOR A CHARAKTERISTIKA APLIKOVANÝCH MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ	11
1.1 3D SKENOVÁNÍ.....	11
1.1.1 OBECNÝ POSTUP APLIKACE 3D SKENOVÁNÍ.....	11
1.1.2 FÁZE 1: SKENOVÁNÍ.....	13
1.1.2.1 KONTAKTNÍ SKENOVÁNÍ	13
1.1.2.2 NEKONTAKTNÍ SKENOVÁNÍ	14
1.1.3 FÁZE 2: ZPRACOVÁNÍ DAT	15
1.1.4 FÁZE 3: VYUŽITÍ ZPRACOVANÝCH DAT	15
1.2 ROZBOR NEKONTAKTNÍCH METOD SKENOVÁNÍ	16
1.2.1 OPTICKÉ METODY MĚŘENÍ.....	16
1.2.2 TRIANGULACE	17
1.2.2.1 AKTIVNÍ TRIANGULACE	17
1.2.2.2 PASIVNÍ TRIANGULACE	22
1.2.2.3 MĚŘICÍ SYSTÉM S TEODOLITEM.....	23
1.2.2.4 FOKUSOVACÍ TECHNIKY	23
1.2.2.5 TECHNIKA „PODOBA ZE STÍNOVÁNÍ“	25
1.3 ROZBOR 3D TISKU	25
1.3.1 PRINCIP 3D TISKU	26
1.3.2 TECHNOLOGIE 3D TISKU	26
1.3.2.1 NA BÁZI FOTOPOLYMERU.....	26
1.3.2.2 NA BÁZI PRÁŠKOVÝCH MATERIÁLŮ	30
1.3.2.3 NA BÁZI TUHÝCH MATERIÁLŮ	33

2 NÁVRH DESIGNU, KONSTRUKCE A TVARU PROTOTYPOVÉHO DÍLU A FORMY	36
2.1 ROZBOR MOŽNÝCH VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ A JEJICH VLIV NA DESIGN.....	36
2.1.1 ROZDĚLENÍ PLASTŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ	36
2.1.2 CHARAKTERISTICKÉ TEPLoty POLYMERŮ	37
2.1.3 REOLOGIE, DISIPAČNÍ OHŘEV A FONTÁNOVÝ TOK TAVENIN.	37
2.1.4 PŘÍSADY POLYMERŮ MODIFIKUJÍCÍ VLASTNOSTI.....	38
2.1.5 FYZIKÁLNÍ PROCESY POLYMERŮ PŘI VSTŘIKOVÁNÍ.....	39
2.1.6 CHARAKTERISTIKA TERMOPLASTŮ	39
2.1.7 NADMOLEKULOVÁ STRUKTURA TERMOPLASTŮ.....	40
2.1.8 SMRŠTĚNÍ TERMOPLASTŮ	41
2.1.8.1 PRŮBĚH TLAKU BĚHEM VSTŘIKOVACÍHO CYKLU	41
2.1.8.2 DEFINICE, TEPELNÁ KONTRAKCE, PVT CHOVÁNÍ	42
2.1.8.3 VLIV GEOMETRICKÉHO TVARU	47
2.1.8.4 REDUKCE SMRŠTĚNÍ.....	47
2.1.8.5 SMRŠTĚNÍ A DEFORMACE	48
2.1.8.6 VNITŘNÍ PNUTÍ.....	50
2.1.9 CHARAKTERISTIKA REAKTOPLASTŮ.....	50
2.1.9.1 DĚLENÍ REAKTOPLASTŮ	50
2.1.10 TIŠTĚNÁ VSTŘIKOVACÍ FORMA & VSTŘIKOVÁNÍ	52
2.1.10.1 MATERIÁLY PRO VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ DO TIŠTĚNÉ FORMY	53
2.1.10.2 NÁVRH FORMY	54
2.1.10.3 DUTINA FORMY	54
2.1.10.4 SOUČÁSTI FORMY	55
VTOKOVÉ ÚSTÍ	55
VTOKOVÉ KANÁLY	56
VTOK	56
VYHAZOVACÍ SYSTÉM	56

CHLADICÍ SYSTÉM	56
UCHYCENÍ FORMY	56
ZÁKLADNA FORMY	57
OCELOVÁ DESKA S VYHAZOVACÍM MECHANISMEM	58
OCELOVÁ DESKA BEZ VYHAZOVACÍHO MECHANISMU	58
TISK FORMY	59
PŘÍPRAVA FORMY PRO VSTŘIKOVÁNÍ	60
KOMPLETACE FORMY A UCHYCENÍ	60
VSTŘIKOVÁNÍ.....	61
UZAMYKACÍ SÍLA	61
2.1.11 VAKUOVÉ LITÍ	61
2.1.11.1 POSTUP VÝROBY	61
2.1.11.2 MATERIÁL LICÍ FORMY	62
2.1.11.3 LICÍ MATERIÁLY	62
2.2 NÁVRH TVARU A DESIGNU	63
2.3 TVORBA IDEOVÉHO 3D MODELU	65
2.4 VOLBA TECHNOLOGIE VÝROBY	71
3 VÝROBA PROTOTYPOVÉHO DÍLU A FORMY	72
3.1 3D MODELACE MASTER MODELU	72
3.2 TISK MASTER MODELU A JEHO ÚPRAVA	75
3.3 VÝROBA JÁDRA A FORMY PRO SILIKONOVOU FORMU	83
4 3D DIGITALIZACE PROTOTYPOVÉHO DÍLU	92
5 ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT – POROVNÁNÍ S ORIGINÁLEM	96
6 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	99
ZÁVĚR	103
POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE	104
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	107
SEZNAM PŘÍLOH	109

ÚVOD

Globalizace trhu nevyhnutelně vede k růstu konkurenčního boje. Tento boj se odehrává ve dvou rovinách.

Nabízený produkt musí spotřebitele prvně zaujmout svým designem, následně potvrdit svoje kvality po stránce jakosti, funkčnosti a např. implementovaných technických novinek. Zájem spotřebitele je v tomto ohledu nutné získat a následně si zachovat pravidelnými technickými inovacemi, udržením si jakosti a v neposlední řadě novým designem. Druhou rovinu determinující spotřebitelovo rozhodnutí o koupi tvoří cena nabízeného produktu. Významnou část ceny tvoří náklady na vývoj a testování produktu před jeho sériovou výrobou.

V roce 1986 si pozdější zakladatel společnosti 3D Systems Chuck Hull nechal patentovat technologii Stereolitografie¹ a koncem devadesátých let představil první zařízení schopné 3D tisku. Technologie 3D tisku řazená též do metod Rapid Prototyping (RP) zaznamenává poslední desetiletí značný vzestup díky technologickému pokroku, medializaci a cenové dostupnosti.

Tuto technologii lze považovat za významného spojence ve fázi vývoje a testování nového produktu. Široká škála nabízených technologií 3D tisku a materiálů, ze kterých je možné tisknout i tvarově komplexní předměty, umožňuje významně zkrátit dobu dodání prvního prototypu. V některých případech se může jednat již přímo o velmi přesný polotovár finálního produktu. Jindy se tento model využívá k tvorbě silikonové prototypové formy pro vakuové lití, nebo je možné přímo tisknout vstřikovací formu nulté série výrobku. Spolu s technologií 3D tisku se mezi moderní technologie urychlující vývoj prototypu dá považovat technologie 3D skenování. Ta se větví do několika skupin, z nichž každá k měření používá různé skenovací technologie a zpracování naměřených dat, ze kterých je vytvořen 3D model měřeného výrobku. Tuto technologii je možné využít v případě výroby duplikátu hotového výrobku, kde není k dispozici jiná dokumentace, nebo se využívá pro měření a následně korekci odchylek prototypových výrobků.

Designerům a vývojářům se po velkém rozvoji softwarového CAD vybavení nabízí nová a snadno dostupná technologie umožňující ověření si vizí a z části i technických parametrů na reálném modelu za zlomek času a ceny, než tomu bylo doposud, a stát se tak konkurenceschopným v rychle se měnící tržní ekonomice.

¹ Stereolitografie je jedna z technologií 3D tisku, která využívá vytvrzování tekutého fotopolymery laserem a umožňuje tak tisknout 3D objekty.

1 POPIS, ROZBOR A CHARAKTERISTIKA APLIKOVANÝCH MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ

Pro výrobu prototypové formy a následné ověření přesnosti bylo využito během postupu technologie 3D tisku a 3D skenování spolu s vakuovým litím. 3D tisk nachází spolu s 3D skenováním využití v širokém spektru průmyslových i jiných odvětví a s rostoucím vývojem těchto technologií roste i jejich spektrum aplikací. Např. reverzní inženýrství patří mezi průmyslové obory, ve kterých tyto technologie hrají nezastupitelnou roli.

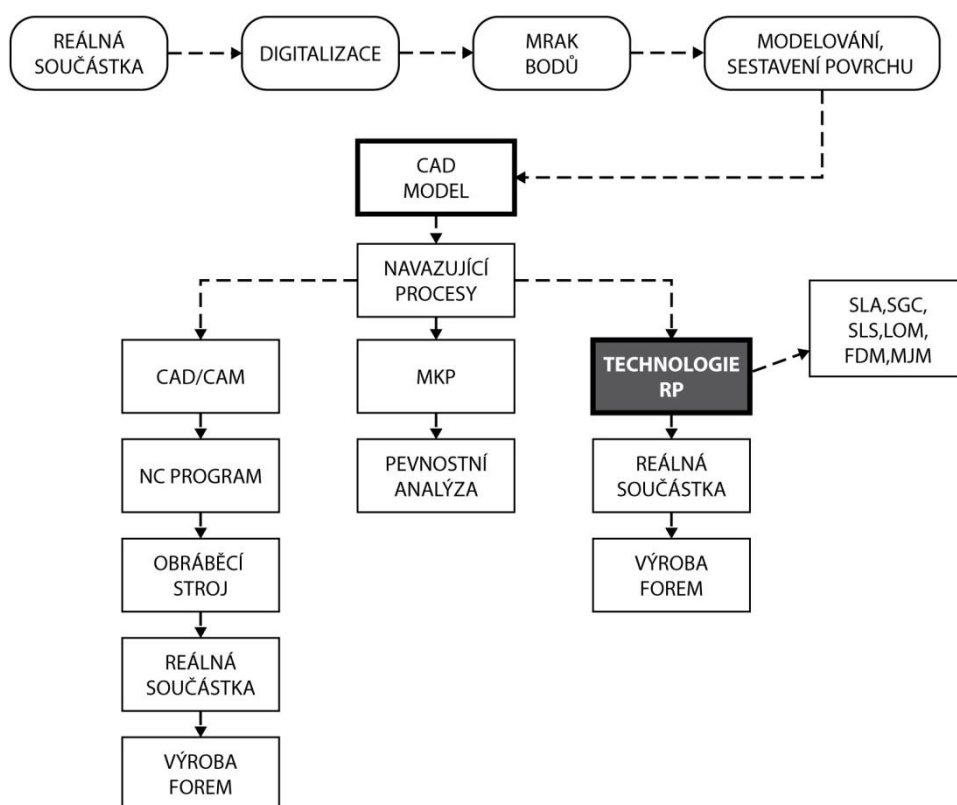
1.1 3D SKENOVÁNÍ

3D skenování se dělí na dvě základní skupiny. První tvoří kontaktní skenování, druhou je nekontaktní skenování. Obě tyto skupiny jsou dále probrány detailněji. V obou případech se jedná o technologii snímající reálný fyzický objekt na obvykle značném množství bodů, přenesení polohy snímaných bodů do PC a následné vytvoření polygonového modelu ze snímaných bodů.

Počátky 3D skenování se datují na začátku osmdesátých let minulého století. Pro snímání byla užívána kontaktní metoda, která k měření využívá kontaktní sondu. Tento systém je značně časově náročný pro vytvoření 3D obrazu celého měřeného tělesa. Množství měřených bodů dle složitosti tvaru tělesa se pohybuje v tisících bodů a více. V osmdesátých letech se rozvíjeli rovněž optické technologie, a tak bylo možné uvažovat o využití optiky pro snímání fyzických objektů. Chyběla však technologie, která by byla schopna zpracovat takové množství dat. V devadesátých letech po rozkvetu počítačové technologie došlo k rozvoji optických skenerů [1].

1.1.1 OBECNÝ POSTUP APLIKACE 3D SKENOVÁNÍ

Postup je možné rozdělit do tří hlavních fází a následných aplikací: skenování, optimalizace mračna bodů, generování polygonového 3D modelu a následné procesy jako je transformace na NURBS plochy nebo tvorba modelu metodou 3D tisku a další navazující procesy uvedené v diagramu na obr. 1-1.



Obr. 1-1: Proces 3D skenování a navazující aplikace, přepracováno z [2].

Pro volbu správného postupu, vhodného přístroje a jeho nastavení je nutné si odpovědět několik otázek:

- kolik částí se bude skenovat a jedná-li se o sestavy,
- velikost skenovaného tělesa,
- tvarová složitost tělesa,
- tuhost skenovaného tělesa a jeho materiálu,
- povrchová úprava tělesa – lesklá, matná,
- geometrie tělesa – hranolová nebo organická, vnitřní nebo vnější,
- požadovaná přesnost [3].

1.1.2 FÁZE 1: SKENOVÁNÍ

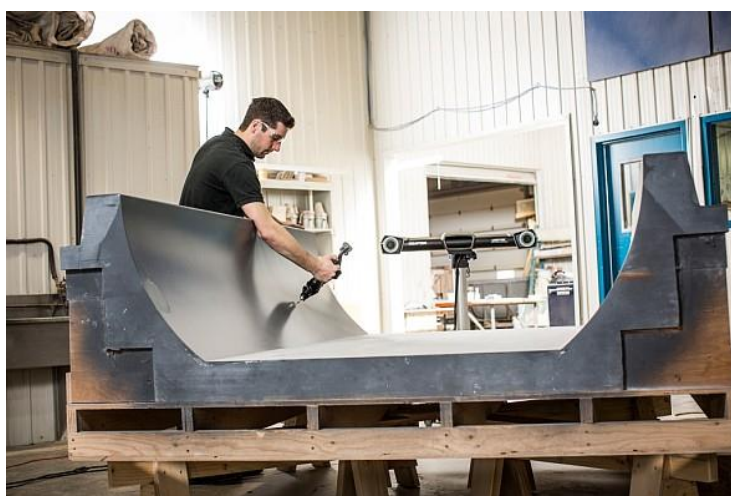
Před započítím samotného skenování se zváží, jak bude probíhat celý proces s přihlédnutím na geometrický tvar, složitost objektu jakou jsou různé díry apod., tuhost předmětu a s tím spojená možnost manipulace bez vzniku deformace objektu, možnost skenování protilehlých ploch a s tím spojené uchycení předmětu v prostoru atd.

Výsledkem 3D skenování je vznik tzv. mračna bodů, které definuje tvar povrchu skenovaného objektu. 3D skenování se dělí na dvě základní techniky: kontaktní a nekontaktní [3].

1.1.2.1 KONTAKTNÍ SKENOVÁNÍ

Může být prováděno ručně mobilním zařízením (Obr. 1-2) nebo uchyceným zařízením na robotické ruce. Tyto skenery jsou založeny na CMM² technologii. Při dotyku hrotu jsou na základě pozice a natočení ramen v souřadném systému měřicího robota vypočteny příslušným softwarem souřadnice hrotu a postupně tvořena množina bodů. Podobný princip se využívá v případě ručních mobilních zařízení, kde se využívá snímání referenčních bodů pomocí optického zařízení sondy.

Výhodou kontaktního skenování je vlastní volba hustoty měřených bodů, lze přesně snímat i kolmé plochy, je možné snímat i reflexní materiál. Nevýhodou je snímání pružně uchycených částí objektů, popř. povrchy vyrobené z měkkých materiálů. Dotykem hrotu dochází k deformaci či posunu části měřeného objektu [4].

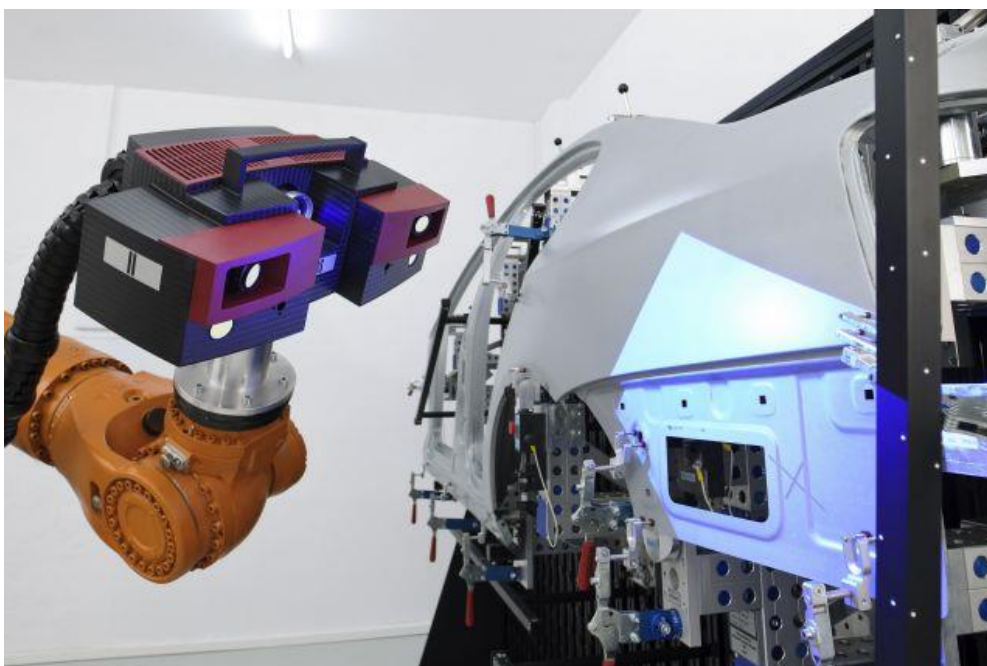


Obr. 1-2: Ukázka kontaktního skenování [4].

² CMM - Coordinate Measuring Machine – zařízení pro měření geometrických charakteristik těles.

1.1.2.2 NEKONTAKTNÍ SKENOVÁNÍ

Tato technika skenování využívá ke snímání laser, strukturované modré světlo (Obr. 1-3), CT-radioskopie³, digitální stereoskopické fotografie a příslušný software (Fotogrametrie). Pro výpočet polohy bodů v prostoru, resp. vůči skeneru, se využívá tzv. triangulace prováděná trigonometrickým výpočtem. Výstupem skenování je mračno bodů zapsaných obvykle ve formátu .txt, .igs, .ascii. Množství bodů je určeno rozlišením použitého skeneru (ATOS TripleScan 2x 5 až 12 mil. bodů). Výhodou nekontaktního skenování je vysoká hustota měřených bodů, možný okamžitý přepočet do 3D modelu, možnost skenovat na mechanické namáhání citlivé komponenty a materiály. Nevýhodou optických systémů využívající strukturované modré světlo je zajistit matný povrch snímaného objektu. Technologie využívající k tvorbě 3D modelu snímky z digitálních fotografií měřeného objektu opatřeného systémem grafických referenčních bodů umožňuje měřit i kontrastní čáry na objektu a díky svému mobilnímu lehce přenositelnému zařízení umožňuje snadno měřit i velké objekty. V současné době jsou dostupné i přenosné ruční skenery využívající ke skenování povrchu laserový paprsek [3, 5].



Obr. 1-3: Ukázka nekontaktního skenování [5].

³ CT Radioskopie– Computed Tomography – počítačová tomografie, rentgenová metoda pro zobrazení vnitřní struktury těles.

1.1.3 FÁZE 2: ZPRACOVÁNÍ DAT

Výraznější modifikace naměřených dat se týká především bezkontaktního skenování. Naměřené mračno bodů je nutné následně podrobit optimalizaci. Uživatel příslušného softwaru využívá různých filtrů, pro adekvátní redukci množství bodů, redukci šumu, korekci chybně či nedostatečně nasnímaných částí objektu atd. Pro zajištění korektního výstupu, odpovídajícího požadavkům na měření, je nutné, aby byl uživatel dobře obeznámen s funkcemi filtrů a jejich algoritmy.

Po dosažení vhodného mračna bodů se z této množiny bodů generuje polygonová síť tvořena elementárními trojúhelníkovými ploškami, uložena ve formátu STL (Stereolithography), popř. OBJ, SAT, PLY, IGES atd. Tuto síť je možné následně příslušným softwarem např. Tebis převést na NURBS⁴ plochy a NURBS model vhodný pro následné vytvoření fyzického modelu zvolenou metodou [3].

1.1.4 FÁZE 3: VYUŽITÍ ZPRACOVANÝCH DAT

Využití nasnímaných a optimalizovaných dat převedených do modelu není jednosměrné. Jedna z hlavních výhod RE a jeho využití je výroba kopie existujícího objektu ve velmi krátkém čase. Jinak zdlouhavé převedení stávajícího fyzického modelu do CAD modelu se použitím 3D skenování extrémně zkrátí při zachování si vysoké přesnosti. Většina CAD systémů je uzpůsobena pro práci s NURBS plochami namísto polygonové sítě, která je při vysokém počtu vertexů⁵ (stovky tisíc) náročná pro zpracování, zobrazení a další modifikace. Pro úpravy takto naskenovaného modelu, a práci s ním ve vztahu k dalším např. dílům sestavy, je tedy vhodné polygonovou síť převést na NUBS plochy obsahující menší množství dat ke zpracování parametrickým definování ploch.

Dalším případem využití skenovaných dat je k tzv. analýza - „as designed“ to „as manufactured“. Skenovaná data se v příslušném softwaru porovnávají s originálním CAD modelem a vyhodnocují se odchylky fyzického výrobku od navrženého produktu [3].

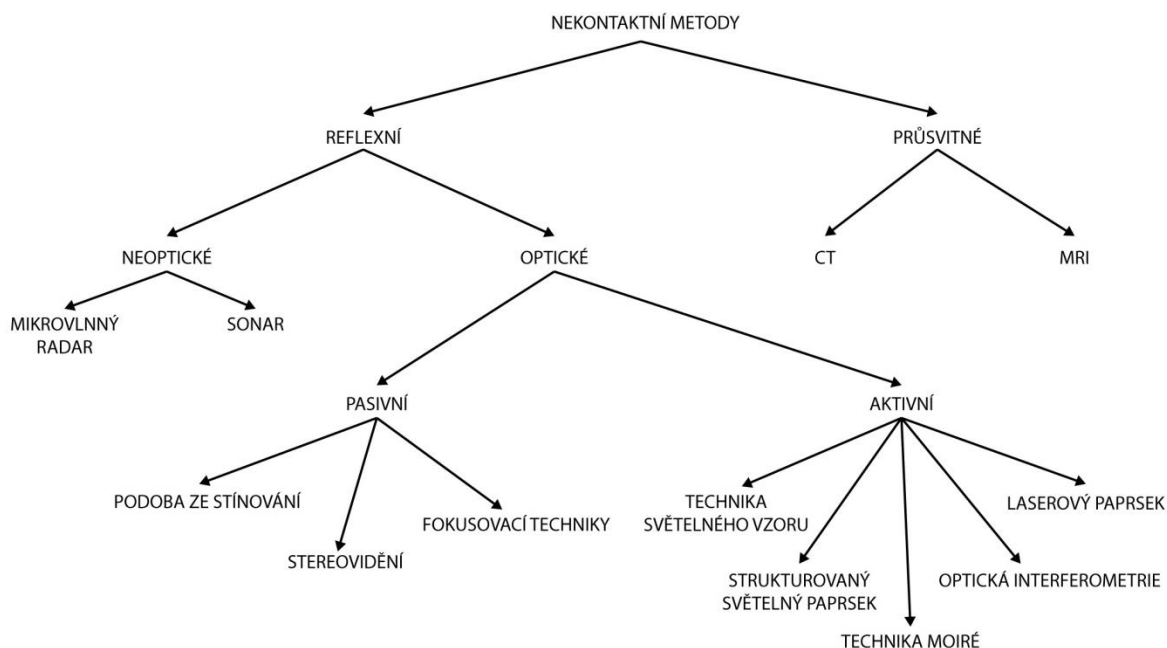
Výhodně je možné RE využít v případě kostních náhrad pacientů. Např. je možné skenovat klouby a na základě pořízeného 3D modelu vytvořit přesnou náhradu pro určitého pacienta. Při takové aplikaci se využívá ke skenování radioskopie – CT, která umožňuje následnou tomografickou rekonstrukcí stínových obrazů složit odpovídající 3D model. Radioskopie si však nachází své uplatnění i ve strojírenství díky své schopnosti vyhodnocovat vnitřní strukturu takového výrobku a odhalit případné defekty [6].

⁴ Racionální Bezierovy křivky s neuniformní parametrizací.

⁵ V počítačové grafice znamená bod v prostoru.

1.2 ROZBOR NEKONTAKTNÍCH METOD SKENOVÁNÍ

Všechny metody mají společný základní princip získávání 2D stínovaných obrazů nebo mračna bodů. Na zkoumaný předmět je emitována energie (světlo, zvuk, elektromagnetické záření, rentgenové záření atd.), která se následně od předmětu odráží, nebo prochází skrz předmět, a je následně zachycena na snímači a zpracována jednou z výpočetních metod [3, 7].



Obr. 1-4: Nekontaktní metody skenování, přepracováno z [3].

1.2.1 OPTICKÉ METODY MĚŘENÍ

Během měření se 3D prostor převádí do dvourozměrného zobrazení (CCD čip, monitor atd.) a tím dochází ke ztrátě hodnoty souřadnice Z. Bez této hodnoty není možné jednoznačně určit polohu snímaného bodu a úloha má nekonečně mnoho řešení. Obdobně jako člověk využívá k rozpoznání prostoru především dvou obrazů, každý pořízený jedním okem, tak se musí při skenování získat kromě 2D obrazu i třetí složka. Tento princip je možné rozdělit na tři základní techniky:

- triangulace,
- optická interferometrie,
- měření doby letu modulovaného světla [7].

1.2.2 TRIANGULACE

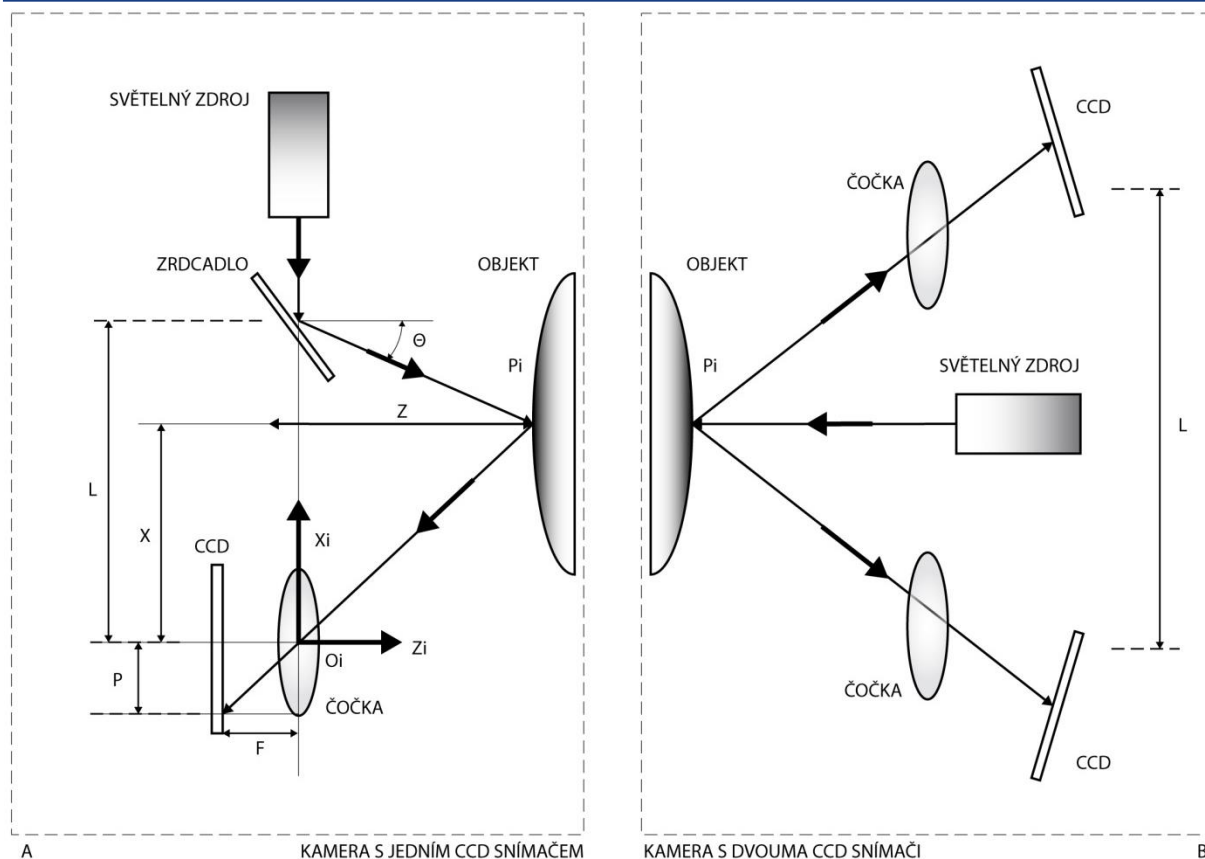
Triangulace patří mezi nejpoužívanější metody optického měření. Tato metoda využívá několik různých technik, ale všechny staví na společném základním principu.

Rozdělení:

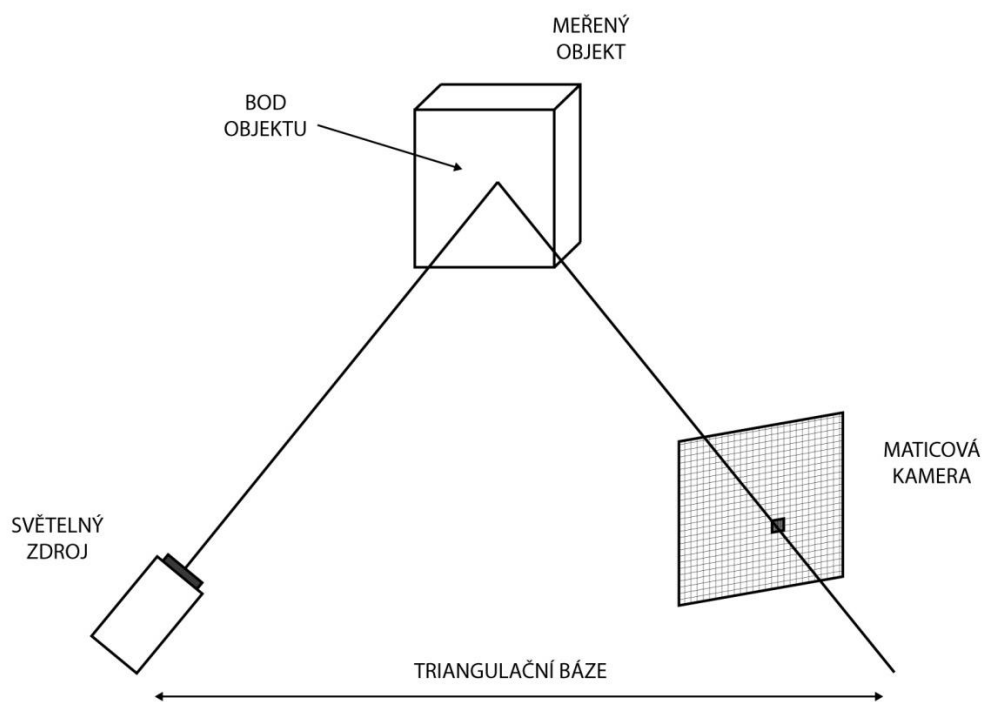
- aktivní triangulace,
- pasivní triangulace,
- měřicí systém s teodolitem,
- fokusovací techniky,
- technika „podoba ze stínování“ [7].

1.2.2.1 AKTIVNÍ TRIANGULACE

Tato metoda je založena na fotogrammetrické rekonstrukci snímaného objektu. Ten je nasvícen světelným zdrojem a současně snímán CCD senzorem, popř. dvěma senzory (Obr. 1-5). Zdroj světla, CCD snímač a měřený bod vytváří tzv. triangulační trojúhelník (Obr. 1-6). Spojnice mezi zdrojem světla a CCD senzorem se nazývá triangulační báze. Úhel mezi bází a paprskem světelného zdroje je neměnný. Úhel na straně snímače mezi bází a odraženým paprskem se mění dle vysvíceného bodu matice CCD senzoru. Z velikosti tohoto úhlu a triangulační báze lze dopočítat souřadnici Z objektu. Jistou nevýhodou triangulační metody s optickým snímáním povrchu je možnost snímat pouze ty části povrchu, které je možné osvětlit a snímat [3, 7].



Obr. 1-5: Schéma triangulace, přepracováno z [3].



Obr. 1-6: Schéma triangulace, přepracováno z [7].

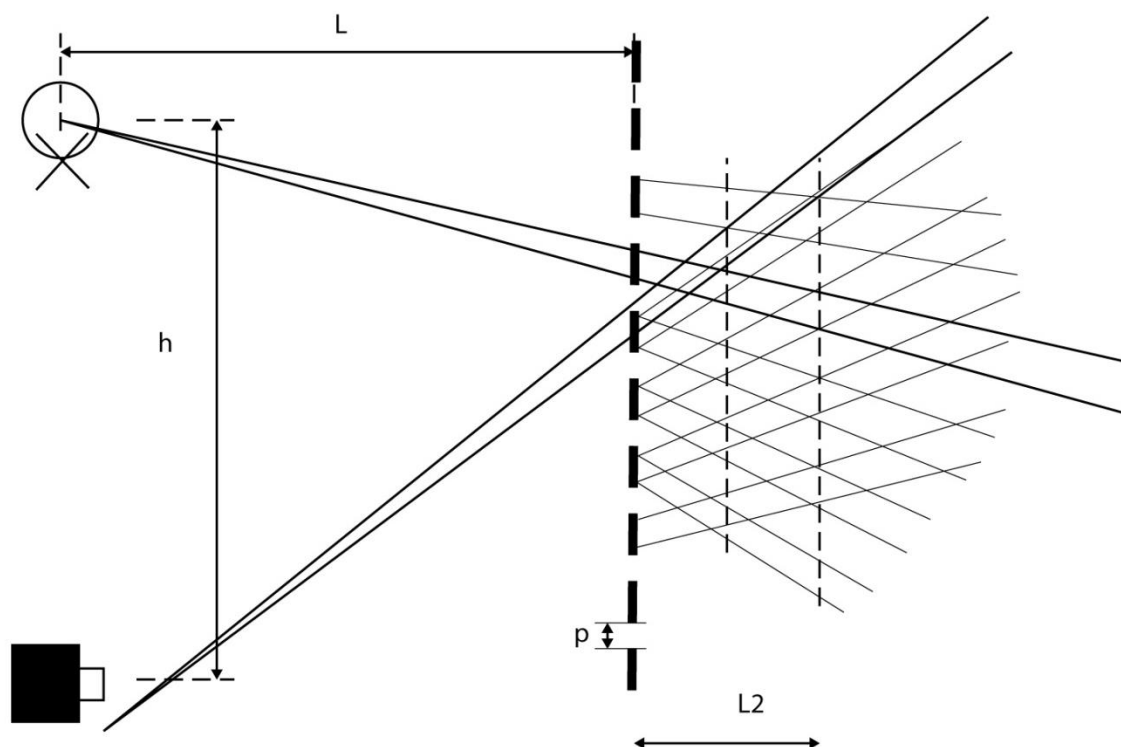
Techniky k označení povrchu:

- světelný paprsek (1D triangulace),
- světelný pruh (2D triangulace),
- strukturovaný světelný paprsek (3D triangulace) [7].

Na rozdíl od 1D a 2D triangulace má 3D triangulace značnou výhodu ve snímání větší plochy na jeden záběr. 3D triangulace využívá několik technik:

TECHNIKA MOIRÉ

Je založena na tzv. systému moiré proužků. Využívá se zdroje světla a kamery v jedné rovině, dále stínidla v paralelní rovině tvořeného proužky a mezerami dané rozteče (Obr. 1-7). Emitované světlo přes stínidlo tvoří vrstevnicové čáry na povrchu skenovaného tělesa [8].

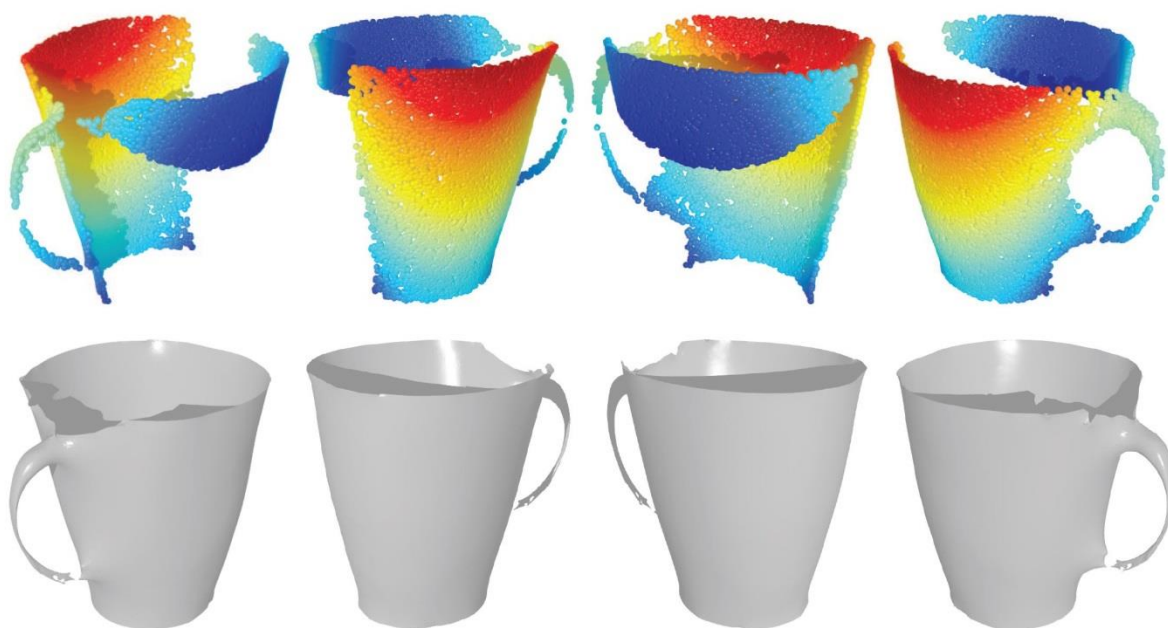


L - vznik vrstevnicového obrazu proužků
 $L2$ - hloubka druhé vrstevnice
 h - vzdálenost kamera světlo

Obr. 1-7: Schéma techniky Moiré, přepracováno z [8].

TECHNIKA SVĚTELNÉHO VZORU

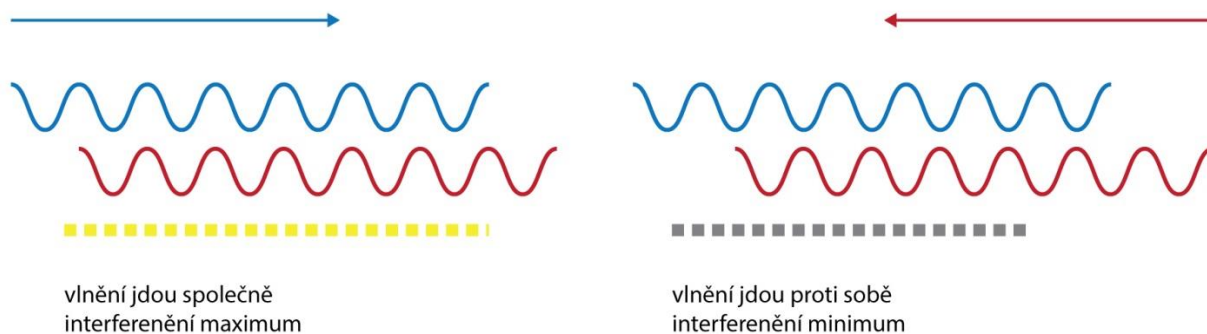
Tato technika je též nazývána jako technika barevného kódu. Využívá úkazu, při němž plochy kolmé ke zdroji záření odrážejí větší množství energie než plochy odkloněné, čímž se jeví světlejší (Obr. 1-8). Na skenovaný objekt je nutné promítat přesně definovaný barevný přechod tzv. duhu. Kolmé plochy se jeví světlejší než ty odkloněné. I přes použití speciálního projektoru a kamery tato metoda není příliš přesná. Na druhou stranu funguje v reálném čase [9].



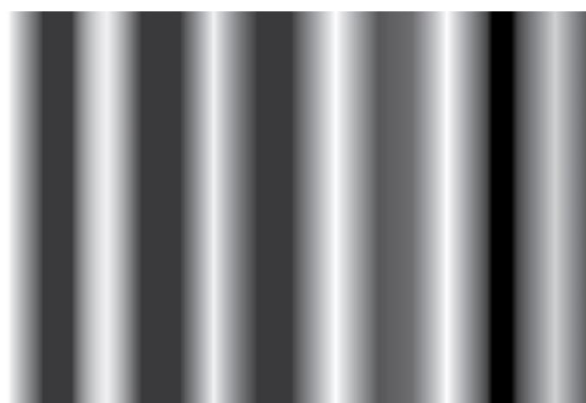
Obr. 1-8: Princip skenování technikou barevného kódu [10].

TECHNIKA FÁZOVÉHO POSUNU – OPTICKÁ INTERFEROMETRIE

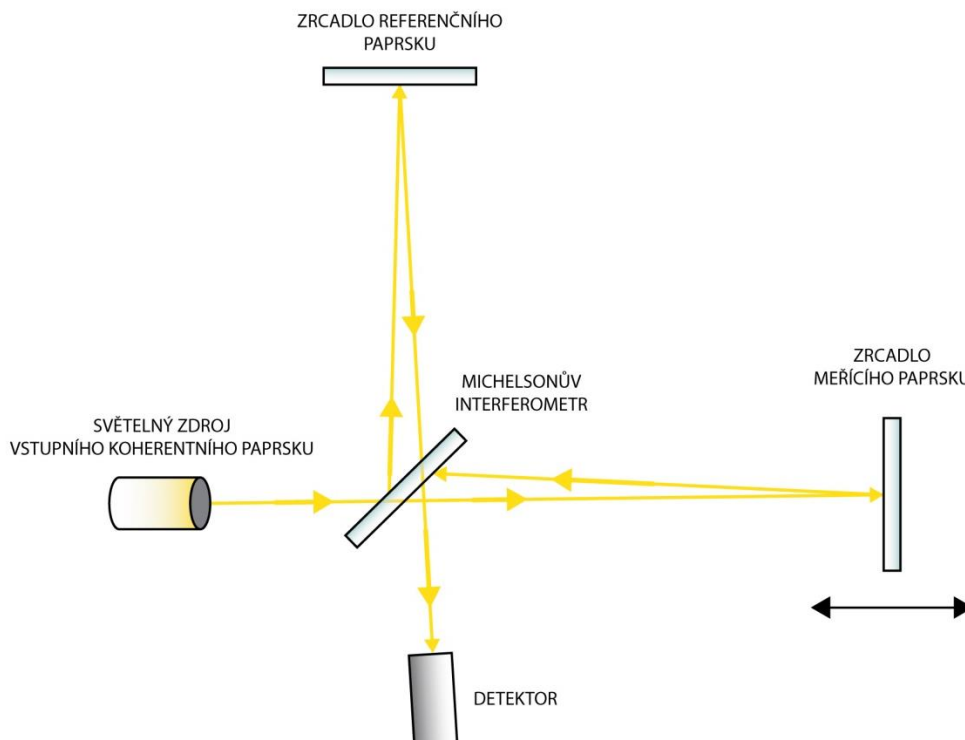
Tato metoda vyniká svoji přesností. Vertikální rozlišitelnost dosahuje úrovně nanometrů a při dobrých podmínkách i vyšší. K měření se používá monochromatické světlo. Měřicí zařízení využívá systém zrcadel, polopropustných zrcadel, detektor a zdroj monochromatického světla. Základní princip spočívá v rozdělení vstupního paprsku polopropustným zrcadlem na dva svazky (Obr. 1-11). Jeden se využívá jako měřicí a druhý jako referenční. Dle profilu povrchu měřicího předmětu dojde ke změně délky dráhy světla oproti referenčnímu paprsku a tomu odpovídající změně vlnové amplitudy výsledného paprsku (Obr. 1-9). Po spojení měřicího i referenčního paprsku v důsledku fázového posunu vzniká interferenční obrazec (Obr. 1-10), který vyhodnotí detektor [11].



Obr. 1-9: Fázový posun, přepracováno z [11].



Obr. 1-10: Interferenční obrazec, přepracováno z [11].



Obr. 1-11: Schéma interferometrie, přepracováno z [12].

1.2.2.2 PASIVNÍ TRIANGULACE

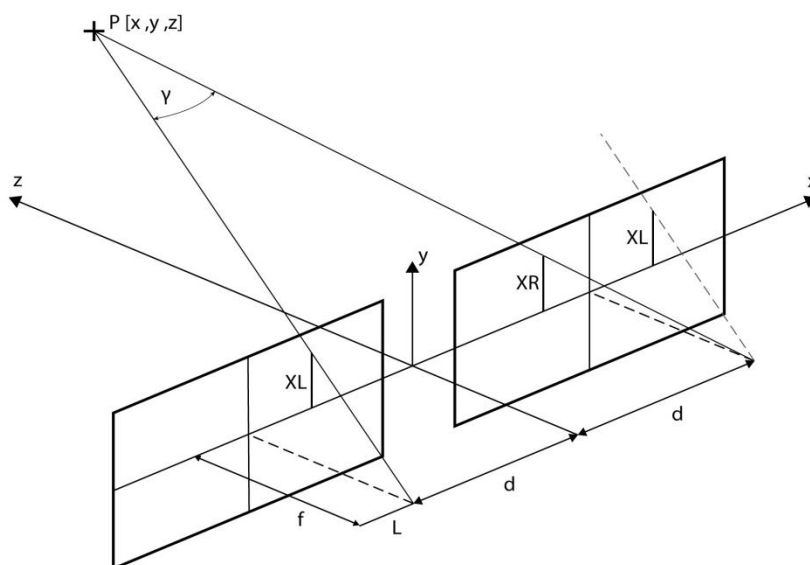
U pasivní triangulace se oproti aktivní nevyužívá strukturované osvětlení měřeného objektu. Vychází z digitální fotogrammetrie, ze které užívá její různé formy.

Používané metody:

- více kamer se známou orientací,
- více kamer se samokalibrací,
- jedna kamera v různých polohách se samokalibrací.

Více kamer se využívá pro dynamické scény se znalostí jejich relativních poloh, nebo se používají samokalibrační metody. Pro statické scény postačí jedna kamera snímající měřený objekt ze dvou a více pohledů. Samokalibrační metoda nevyžaduje předem znalost polohy kamery či kamer. Její poloha se odvozuje přímo ze snímků. Pro tento postup je vhodné do scény umístit referenční - kalibrační předmět. Ten má určený rozměr a tvar často doplněný o geometrický vzor, jenž slouží pro výpočet polohy kamery na základě změny měřítka a natočení [3].

Často využívanou metodou nejen pro měření, ale i v současné době pro virtuální realitu založenou na obdobném principu, je stereovidění. Využívá se obdobného systému jako v případě lidského vnímání prostoru. Lidské oči jsou průměrně vzdáleny 65 mm. Obdobně jsou od sebe vzdáleny při měření CCD snímače, které tak snímají tzv. stereoskopické snímky (Obr. 1-12). Paprsek vyslaný směrem ke snímačům je na každém z nich zachycen na jiném místě. Tento rozdíl je určen velikostí úhlové paralaxy - γ . Pro bližší body je velikost úhlové paralaxy větší než pro body vzdálené. Při znalosti polohy vykresleného bodu P na obou snímačích je možné spočítat jeho polohu x, y, z v prostoru viz vzorec 1 [3, 13].



Obr. 1-12: Schéma interferometrie, přepracováno z [13].

$$x = x_L \frac{2d}{x_L - x_P} \quad y = y_L \frac{2d}{x_L - x_P} \quad z = \frac{2df}{x_L - x_P} - f \quad [13]. \quad (1)$$

2d - vzdálenost mezi optickými osami kamer,

f - jejich ohnisková vzdálenost kamer,

x_L a x_P - souřadnice řešeného bodu v obrazové rovině z = 0.

Rozdíl x_L - x_P se označuje jako horizontální paralaxa [13].

1.2.2.3 MĚŘICÍ SYSTÉM S TEODOLITEM

Tato metoda se vyznačuje vysokou přesností. Její nevýhodou je časová náročnost. Využívá se především ve stavebnictví a geodézii pro měření rozměrných předmětů.

Metoda vyžaduje měření nejméně dvěma teodolity. Ze známých pozic teodolitů, horizontálních a vertikálních úhlů jsou vypočteny 3D souřadnice. Moderní teodolity jsou vybaveny kvalitním dalekohledem. Měření a vyhodnocení obstarává vestavěná elektronika. Některé typy mají integrovaný laserový měřič vzdálenosti [14].

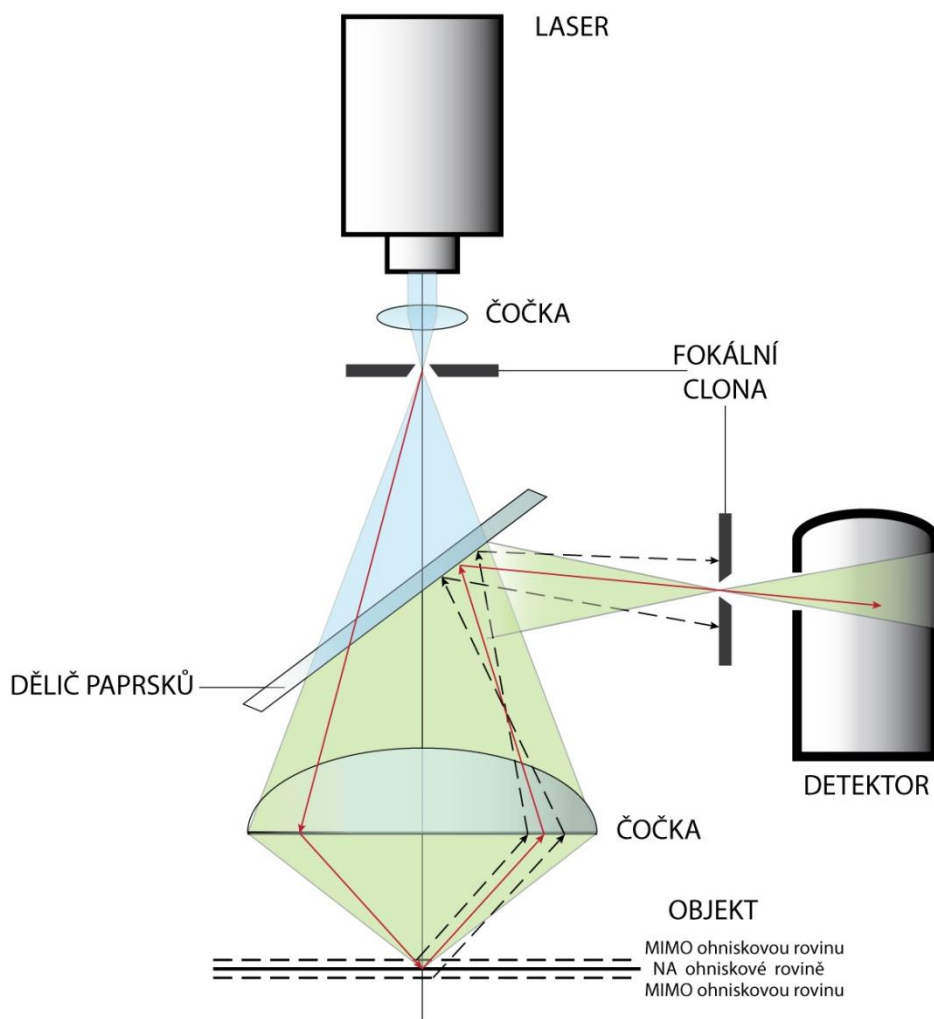
1.2.2.4 FOKUSOVACÍ TECHNIKY

Využívají se 3 metody:

KONFOKÁLNÍ MIKROSKOPIE

Konfokální mikroskop (Obr. 1-13) snímá světlo pouze ve své ohniskové rovině a tím dosahuje vyšších rozlišovacích schopností. Používají se dva typy mikroskopů – rastrující konfokální mikroskop a konfokální mikroskop s rotujícím diskem. První typ využívá posunu ohniska excitujícího laserového paprsku a druhý obsahuje rotující Nipkowův kotouč obsahující mnoho oddělených clonek.

K osvětlení vzorku se využívá laser. Ten je fokusován na clonku a další čočkou fokusován na plochu snímaného objektu. Průměr snímané oblasti je roven difrakční mezi. Odražené světlo jde opět přes čočku k děliči paprsků a další fokální clonkou je odstíněno světlo odražené z jiné než ohniskové roviny. Obraz celé ohniskové roviny se snímá bod po bodu rozmítáním laserového paprsku, příčným posuvem vzorku před objektivem nebo posuvem objektivu nad vzorkem. Snímáním různých úrovní lze následně sestavit 3D model [14, 15].



Obr. 1-13: Schéma konfokální mikroskopie, přepracováno z [15].

KONTROLOVANÉ FOKUSOVÁNÍ

Profily se získávají postupným skenováním zaostřené XY roviny. Softwarově jsou následně snímky sestaveny do 3D zobrazení. [14].

METODA ROZFOKUSOVÁNÍ

Tato metoda využívá optického jevu tzv. difrakce světla. Jedná se o ohyb světla způsobený jeho vlnovou délkou při průchodu otvorem rozměrově blízkým vlnové délce světla. Vzdálenost měřeného bodu je následně určena z průměru a intenzity difrakčního kroužku [14].

1.2.2.5 TECHNIKA „PODOBA ZE STÍNOVÁNÍ“

Vychází ze známé pozice kamery a zdrojů světla. Na základě ozáření, odlesků a stínů na snímaném obraze se vypočtou normály elementárních částí obrazu, ze kterých se následně zrekonstruuje poloha a rotace plošky v prostoru a sestaví se celý snímaný model. Systém snímání obrazů skenovaného objektu může být prováděn s pohyblivými zdroji světla, snímky z různých pohledů a snímky s různým osvětlením [14].

1.3 ROZBOR 3D TISKU

Technologie 3D tisku spadající mezi metody RP se řadí mezi aditivní technologie výroby. Jedná se o opačný postup výroby ve srovnání s technologiemi obrábění. Nemění se tvar polotovaru zmenšováním objemu na výsledný obrobek, ale výsledný tvar přímo vzniká během procesu 3D tisku nárůstem svého objemu. Je možné využít různé technologie a pro ně různé materiály, ale jedna charakteristika je všem společná. Vrstvou po vrstvě se tvoří výsledný model.

První 3D tisk byl představen koncem osmdesátých let, kde mu bylo nazýváno „Rapid Prototyping“, protože hlavním účelem vymyšlení této technologie bylo efektivnější vyrábění prototypů. První podaný patent byl v květnu 1980 panem Dr. Kodama v Japonsku. Tento patent však nebyl z administrativních důvodů uznán. Další patent přišel roku 1986 panem Charles Hull. Tento patent se týkal technologie SLA (stereolithography apparatus). Krátce na to byl podán panem Carl Deckard patent na SLS technologii (Selective Laser Sintering). Následovali další patenty od dalších lidí jako např. patent na dnes velmi rozšířenou metodu FDM (Fused Deposition Modelling) podaným panem Scott Crump, spoluzakladatelem společnosti Stratasys Inc a 3DP (three dimensional printing) patent podaný panem Emanuel Sachs. Bylo vytvořeno několik dalších technologií 3D tisku a následoval boj o zdokonalování těchto technologií, snížení pořizovací ceny i ceny za tisk. V roce 2004 se dostala do popředí myšlenka 3D tiskárny dostupné široké veřejnosti. Dr. Bowyer přišel s RepRap „open source“ konceptem sebe replikující tiskárny. Za stálého rozvoje, vylepšování a tvorbě modifikací 3D tiskových technologií, se v současnosti uživatelé mohou těšit velice kvalitním tiskárnám s širokou nabídkou materiálů a přesnosti tisku [3, 16].

1.3.1 PRINCIP 3D TISKU

Jak již bylo zmíněno, základním principem aditivní technologie je postupné přidávání materiálů. V případě 3D tisku se jedná o vrstvení jemných vrstev.

3D tiskárny využívají 3D CAD model, který příslušný software převede do formátu STL. STL definuje povrch tělesa pomocí trojúhelníkových ploch. V případě oblých tvarů je nutné pro dosažení požadované přesnosti v takové části modelu snížit jejich rozměr, a tedy navýšit jejich počet a tím množství dat ke zpracování. Optimalizace takového modelu je jednou z důležitých přípravných prací pro tisk.

Následuje rozřezání CAD modelu na tenké vrstvy obvykle kolmé k ose Z. Výška vrstev odpovídá použité technologii a tiskárně. Před započítím rozřezání modelu je nutné vhodné umístění a natočení modelu v tiskovém prostoru.

Některé vrstvy modelu se mohou v okrajových částech v důsledku přílišného přesahu předešlé vrstvy bortit. Z tohoto důvodu je nutné pro tato místa vystavět podpory. Některé technologie vystavení podpor nevyžadují a u jiných je současný software tiskáren schopen autonomně dle zvolených pravidel identifikovat místa, kde je nutné tyto podpory vystavět. Při přípravě modelu na tisk, včetně jeho orientace v tiskovém prostoru, je nutné myslet na nutnost následného odstranění vystavených podpor.

Po dokončení tisku vrstvy po vrstvě, je v některých případech nutné model dále upravit. Odstranit podpory, očistit model popř. provést dodatečné povrchové úpravy [16].

1.3.2 TECHNOLOGIE 3D TISKU

Během vývoje tohoto odvětví aditivních technologií bylo vymyšleno a zkonstruováno několik různých technik se společným základem tvorby modelu pomocí nanášení tenkých vrstev. Každá z nich měla svoje výhody i nevýhody a každá z nich se hodila pro jiné využití [16].

Mezi ty nejpoužívanější patří:

1.3.2.1 NA BÁZI FOTOPOLYMERU

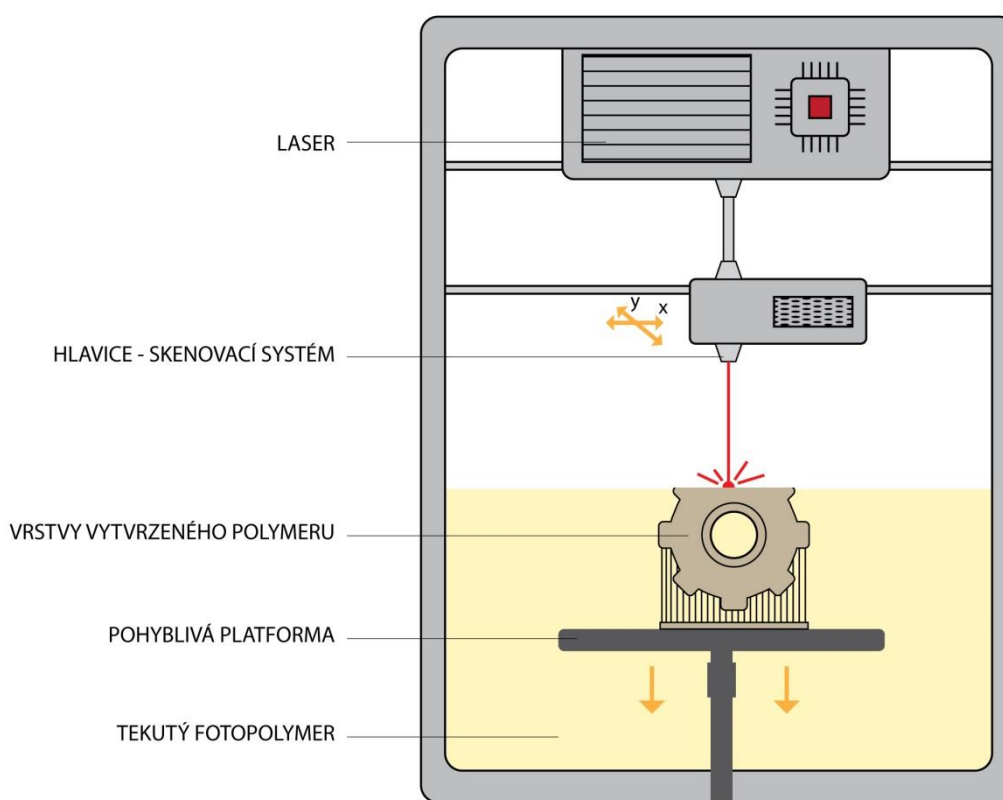
STEREOLITOGRAFIE – SLA, SL

Stereolitografie byla první technologií užitou pro 3D tisk. Pro tisk modelu se využívá tekutého fotopolymeru vytvrzovaného laserovým paprskem. Tloušťka vytvrzované vrstvy se obvykle pohybuje kolem 0,05 až 0,15 mm. Tiskárna obsahuje

nádrž s fotopolymerní látkou, ve které je vnořena platforma pro stavbu modelu. Ta se po vytvrzení vrstvy laserem postupně noří do nádrže s fotopolymerem nebo pryskyřicí (Obr. 1-14). Platforma se pohybuje v ose Z směrem dolů, zatímco hlava s laserem se pohybuje v osách X a Y [3].

Tato technologie vyžaduje v případě převisných částí vystavení podpor, které jsou po dokončení tisku odstraněny. Obvykle je vhodné též provést finální povrchovou úpravu modelu, jako je např. vystavení modelu intenzivnímu UV záření v přístroji pro dotvrzení fotopolymeru.

Stereolitografie se řadí mezi nejpřesnější metody 3D tisku s velmi dobrými vzhledovými a povrchovými vlastnostmi. Není však příliš odolná vůči mechanickému a teplotnímu namáhání [3, 16].



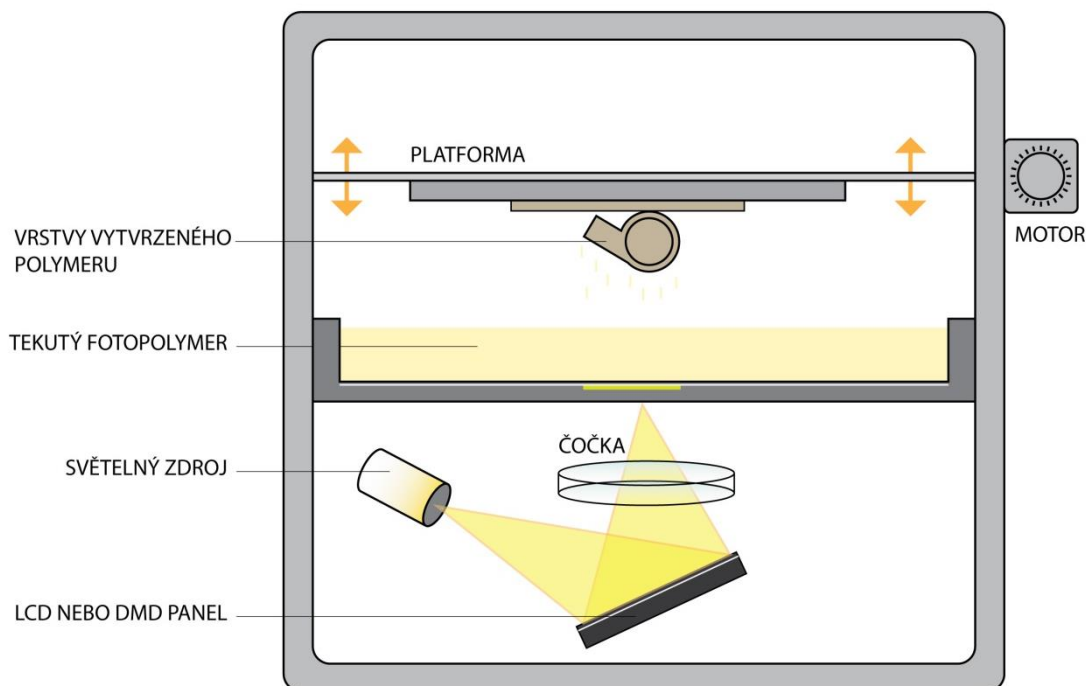
Obr. 1-14: Schéma stereolitografického tisku, přepracováno z [16].

DIGITAL LIGHT PROCESING – DLP

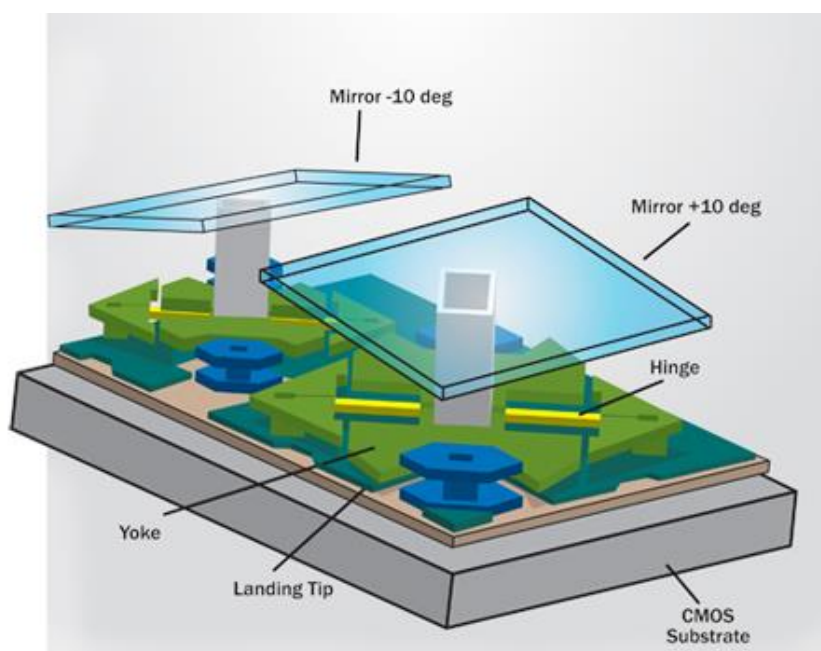
DLP technologie se stereolitografií podobá vytvrzováním fotopolymeru. Hlavním rozdílem od SLA je zdroj světla, který je obvykle tvořen výkonnou lampou (Obr. 1-15). Segment z tištěné plochy je rozložen do rastrového obrazce příslušného rozlišení. Jednotlivým bodům je posléze určeno, zda se mají tisknout. Tato matice je posléze tištěna za pomoci LCD nebo DMD (deformable mirror device) panelu (Obr.

1-16), jenž světelný paprsek v tištěných bodech odráží či propouští přes čočku na plochu fotopolymeru. Pro body, které se nemají tisknout - vytvrzovat, je světelný paprsek pomocí DMD panelu odkloněn, nebo v případě LCD, pohlcen.

Kvalita této technologie je obdobná jako v případě SLA. Výhodu oproti SLA technologii je malé množství fotopolymeru v nádrži, a tedy snížení nákladů na celý proces [16, 17].



Obr. 1-15: Schéma DLP tisku, přepracováno z [16].



Obr. 1-16: Schéma DMD panelu [17].

SOLID GROUND CURING - SGC

Konstrukční platforma je na začátku umístěna v nejvyšší poloze a je pokryta tenkou vrstvou fotopolymeru. První vrstva CAD modelu je prvně přenesena na skleněnou destičku. Plocha, která má být vytvrzena, je na destičce transparentní a druhá část je zabarvena použitím elektrostatického procesu. Následně je destička umístěna mezi konstrukční plochu s fotopolymerem a UV zdroj světla. Transparentní část je následně vytvrzena a neprůhledná část ponechá fotopolymer na konstrukční desce tekutý. Tato část fotopolymeru je po odejmutí skleněné destičky odsáta. Na destičku se připraví nová vrstva CAD modelu.

Mezitím je vodou rozpustný vosk vpraven do části odstraněného fotopolymeru. Následně je celá plocha obrobena frézou na požadovanou povrchovou strukturu a tloušťku vrstvy. Následuje opakování celého procesu.

Model jako SLA často bývá dotvrzován UV lampou a je nutné odstranit podpory. Výhodou je dobrá struktura modelu a jeho stabilita. Nevýhodou jsou však velké rozměry zařízení, usazeniny vosku a množství odpadu [18].

MULTI JET MODELING – MJM

Metoda se principiálně podobá metodě FDM. Nad platformou se pohybuje tisková hlava, která po jednotlivých vrstvách tloušťky (až 16 mikrometrů) tiskne výsledný model. Tiskovou hlavu však oproti FDM tvoří 352 a více trysek vedle sebe uspořádaných v délce cca 200 mm dle typu tiskárny (Obr. 1-17). Hlava tedy zaujímá celou šíři tisknutelné plochy a je možné na jeden přejezd tisknout jednu vrstvu modelu. Materiálem je fotopolymer, který je po tisku každé vrstvy vytvrzován UV zářením. Podpůrný systém modelu proti zborcení a vyplnění mezer je tvořený voskem a je tisknut stejnou hlavou v každé vrstvě spolu s fotopolymerním materiálem.

Výhodou je rychlejší tisk a možnost tisknout model z různých materiálů. Ty se mohou lišit svými mechanickými i optickými vlastnostmi. Dříve malá přesnost modelu a menší velikost tisknutelného modelu tvořili výrazné nevýhody. S rozvíjejícími se technologiemi jsou však tyto vlastnosti odbourávány a v současné době je kvalita tisku na velmi vysoké úrovni [3].



Obr. 1-17: Tisková hlava MJM tiskárny Stratasys J750.

1.3.2.2 NA BÁZI PRÁŠKOVÝCH MATERIÁLŮ

SELECTIVE LASER SINTERING – SLS , DIRECT METAL LASER SINTERING – DMLS, SELECTIVE LASER MELTING – SLM

Všechny tyto metody, mají společný základ výroby. Pro výrobu je použit materiál ve formě prášku. Pro převod práškové fáze do pevného modelu se používá laser (Obr. 1-18). CAD model je převeden do formátu STL a následně rozřezán na tisknutelné vrstvy.

SLS a DMLS se liší pouze materiálem užitým pro výrobu. V případě SLS se jedná o obecnější popis a materiálem může být kov, keramika, plast, písek. V případě DMLS se uvažuje, že bude použit kovový prášek jako např. nerezová ocel EOS GP1, martenzitická ocel EOS MS1, slitina bronz - nikl DM 20, slitina kobalt-chrom EOS CC MP1 a další. V obou případech jde o spékání prášku. Kov tedy není taven, ale pouze přiveden na takovou teplotu, kdy se na molekulární úrovni mohou jednotlivé zrna spojit. Poróznost materiálu je tedy možné kontrolovat [3, 16].

Tabulka 1: *Mechanické vlastnosti vybraných práškových materiálů [2].*

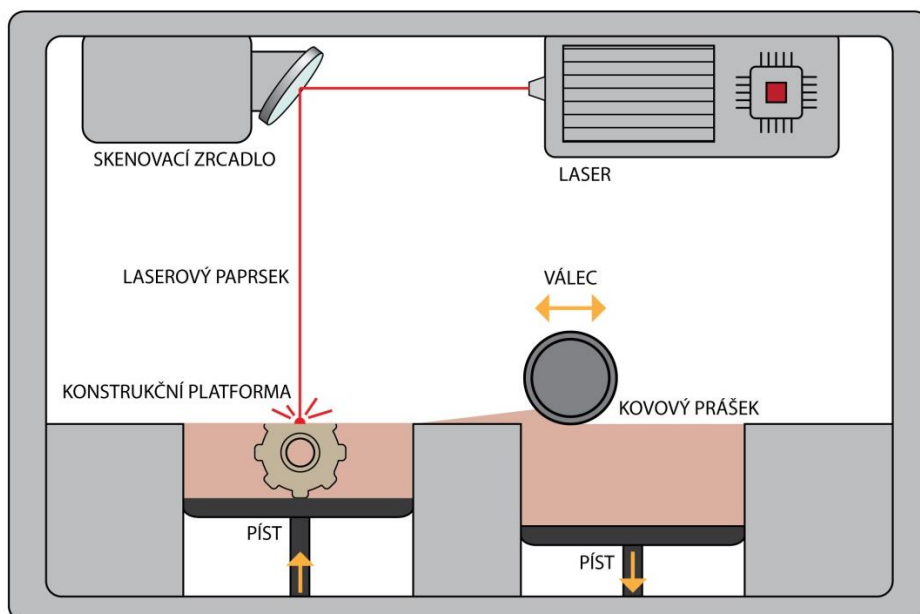
	Nerezová ocel EOS GP1	Martenzitická ocel EOW MS1	Slitina bronz-nikl DM 20
Min. tloušťka stěny	0,4 mm	0 - 4 mm	0,6 mm
Rychlost stavby	2 - 5 mm ³ /s	2 - 4 mm ³ /s	10 - 20 mm ³ /s
Zbytková porozita	-	-	8%
Mez pevnosti R _m	900 MPa	1100 (1950*) MPa	400 MPa
Mez kluzu R _{p0,2}	500 MPa	1000 (1900*) MPa	200 MPa
Modul pružnosti	190 GPa	180 GPa	80 GPa
Tvrdost povrchu	23 - 33 HRC	36 - 39 (50 - 54*) HRC	120 HV
Max. pracovní teplota	550 °C	400 °C	400 °C

* tepelně zušlechťený materiál

SLM využívá většího výkonu laseru a kovový prášek taví. Prášek tedy není jen spojen do pevné struktury, ale je převeden do homogenní hmoty a tedy i homogenního modelu. Každý kov má svůj bod tavení a z toho důvodu je SLM vhodné pro výrobu modelů z čistých kovů jako např. titan apod.

Princip nanášení jednotlivých vrstev a následné spékání či tavení je obdobný. Prášek je ve vrstvách pomocí válce či keramického bříty nanášen na konstrukční platformu, následně laserem spečen či taven. Konstrukční rovina se o výšku jedné vrstvy sníží a rovina zásobníku s práškem se o stejnou výšku zvýší. Válec opět přenesse tuto vrstvu prášku ze zásobníku na konstrukční rovinu a proces se opakuje. Tloušťka jedné vrstvy se pohybuje mezi 0,020–0,040 mm. Konstrukční podpory automaticky tvoří nespečený prášek. Pro většinu materiálů je komora během tisku vyplněna dusíkem a materiál neoxiduje. Ve všech případech následují dokončovací práce. Odstranění podpor, tryskání, obrábění, broušení atd. jako u běžného polotovaru.

Výhodami takto tvořených výrobků je jejich pevnost a velká škála využitelných materiálů. Hlavní nevýhodou je nízká kvalita povrchu určená velikostí zrn prášku.



Obr. 1-18: Schéma SLS, DMLS, SLM tisku, přepracováno z [16].

3D PRINTING – 3DP

Jedná se o velmi rychlý způsob výroby z prášku. Rozprostřený prášek v tenké vrstvě je spojován s dalšími pomocí speciálního lepidla. To je v tiskové hlavě k dispozici v barvách CMYK a je tedy možné model tisknout v barevné hloubce 24 bit. Vrstvu po vrstvě se tak může tisknout plnobarevný model. Rozlišení tiskové hlavy je až 600x540 dpi. Většina neslepeného prášku je opět využita díky automatizovanému systému odstranění nevyužité části prášku.

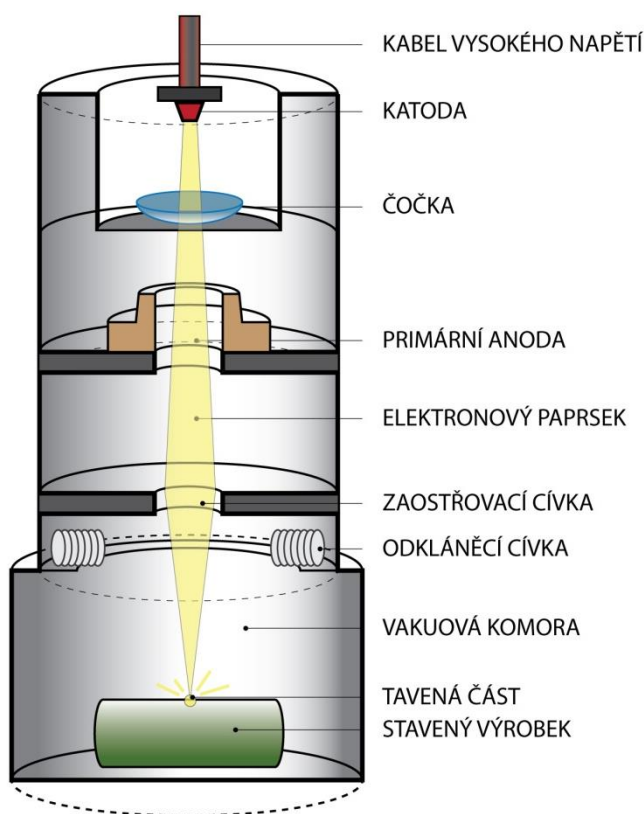
Model je po dokončení nutné zpevnit speciálními infiltranty ponořením nebo nanesením štětcem.

Model může být vyroben z vysoce pevných materiálů, kdy snáší pevnost v tlaku až 10 MPa, nebo s vlastnostmi pryže s využitím snap-fit materiálů a následnou infiltrací speciální epoxidovou pryskyřicí.

THE ELECTRON BEAM MELTING – EBM

Tato technologie je patentována švédskou společností ACRAM. Základní princip je obdobný jako v případě DMLS. Rozdíl tvoří zdroj tepla a podmínky uvnitř komory. Tavné teplo je zajištěno elektronovým paprskem. Uvnitř komory je tedy nutné zajistit vakuum (Obr. 1-19).

Hlavní předností je výroba homogenního kovu a to i v případě různých slitin. Této technologii se tedy využívá v medicínském prostředí a dalších hi-tech odvětvích.



Obr. 1-19: Schéma EBM tisku, přepracováno z [16].

1.3.2.3 NA BÁZI TUHÝCH MATERIÁLŮ

Princip výroby se zásadně liší od kapalných materiálů. Materiál se na počátku vybírá v tuhé fázi.

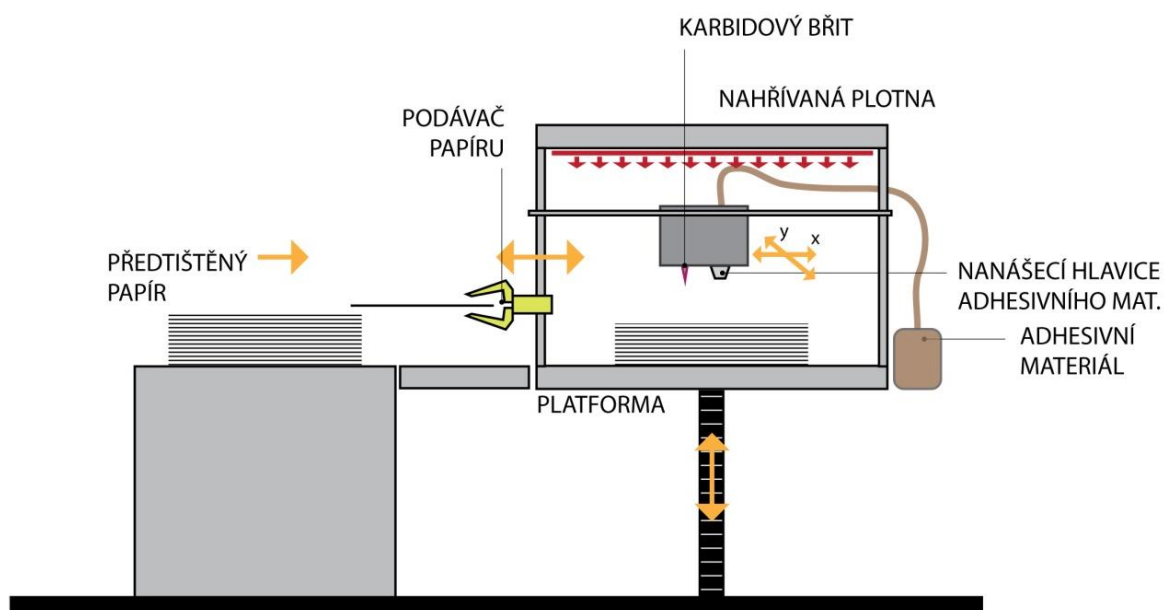
LAMINATED OBJECT MANUFACTURING – LOM, SELECTIVE DEPOSITION LAMINATION – SDL

Tyto metody mají obdobný princip tvorby modelu. V obou případech se jedná o vrstvení tenkých listů - fólií s následným odstraněním odpadních částí.

V případě LOM je každá vrstva tvořena materiálem ve formě fólie. Nejčastěji je používán papír. Jednotlivé vrstvy jsou k sobě lepeny adhezivním materiálem. V místě modelu je nanášen hustěji oproti místu podpor. V každé vrstvě je vyřezána laserem kontura modelu. Podpory jsou rozřezány na menší kvádry a následně odstraněny.

SDL technologie na sebe lepí jednotlivé vrstvy - listy papíru adhezivním materiálem. V místě modelu je nanášení výrazně hustější. Po nanesení adhezivního materiálu a umístění nové vrstvy papíru je konstrukční platforma zvednuta nahoru k nahřáté plotně a přitlačena k ní. To zajišťuje kvalitní dolehnutí nové vrstvy a funkčnosti adhezivní vrstvy. Následně je platforma spuštěna zpět do původní polohy a karbidovým břitem je v tloušťce jedné vrstvy vyřezána kontura výrobku (Obr. 1-20).

Nevýhodou této technologie je nebezpečí poškození modelu během odstraňování podpor, poměrně nízká tuhost. Zároveň není vhodná pro tenkostěnné modely.



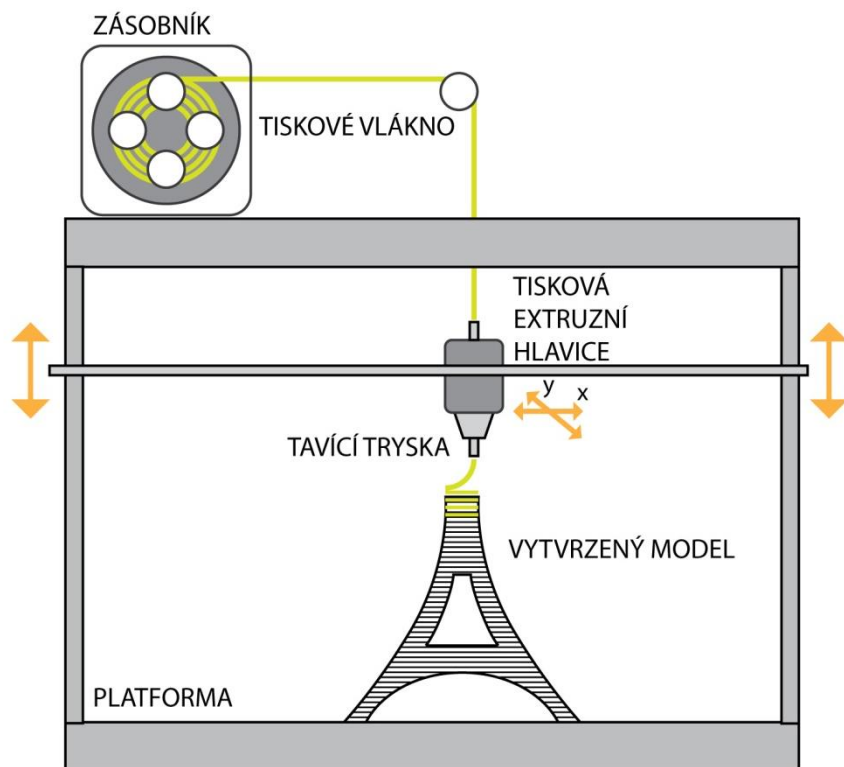
Obr. 1-20: Schéma SDL tisku, přepracováno z [16].

VYTLAČOVÁNÍ, FUSED DEPOSITION MODELING – FDM

Vytlačování je jednou z nejpoužívanějších forem v širokém měřítku uživatelů. Název FDM je obchodním jménem registrovaným firmou Stratasys. Název se natolik vžil, že je používán jako obecný název pro vytlačování.

Princip je založen na tavení struny z termoplastu ve vyhřívané tiskové hlavě a nanášení na model vrstvu po vrstvě. Jednotlivé tištěné pruhy přilnou k předešlé vrstvě a ztuhnou. Běžně se k tisku používá ABS, PLA, PC atd. Tisková hlava se pohybuje v rovině X, Y. Po dokončení vrstvy se o výšku nové vrstvy zvedne a pokračuje v tisku další vrstvy (Obr. 1-21).

Modely vytvořené touto metodou svojí pevností téměř odpovídají reálným modelům ze stejného materiálu. Mezi nevýhody patří především horší povrchové vlastnosti. Ty je možné upravit dokončovacími technikami.



Obr. 1-21: Schéma FDM tisku, přepracováno z [16].

2 NÁVRH DESIGNU, KONSTRUKCE A TVARU PROTOTYPOVÉHO DÍLU A FORMY

V rámci práce na propagačních materiálech motorky Midalu pro společnost Moto FGR došlo k domluvě návrhu možného designového řešení jednoho ze stěžejních dílů kapotáže a výrobě koncepčního modelu. V současné době se jedná pouze o ideovou práci, která se bude pravděpodobně dále po stránce designu a následně konstrukčního řešení vyvíjet.

2.1 ROZBOR MOŽNÝCH VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ A JEJICH VLIV NA DESIGN

Pokud navržený design bude po testování prototypového výrobku schválen, předpokládá se jeho sériová výroba technologií vstřikování plastů popř. u některých kusů metodou vakuového lití. V případě vstřikování plastů se vzhledem k předpokládanému malému objemu výroby zvažuje plastová vstřikovací forma, popř. silikonová forma pro vakuové lití plastů. Pro výběr vhodné metody výroby, zajištění vysoké jakosti výstřiku a správného návrhu geometrie výrobku a formy, je nutné znát principy chování plastů a proces výroby během vstřikování a vakuového lití plastů.

2.1.1 ROZDĚLENÍ PLASTŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ

Plasty se řadí do skupiny polymerů, které se dále dělí na další podskupiny: **reaktoplasty, termoplasty, termoplastické elastomery a elastomery** viz tab. 2.

Tabulka 2: Rozdělení polymerních materiálů [19, str. 16].

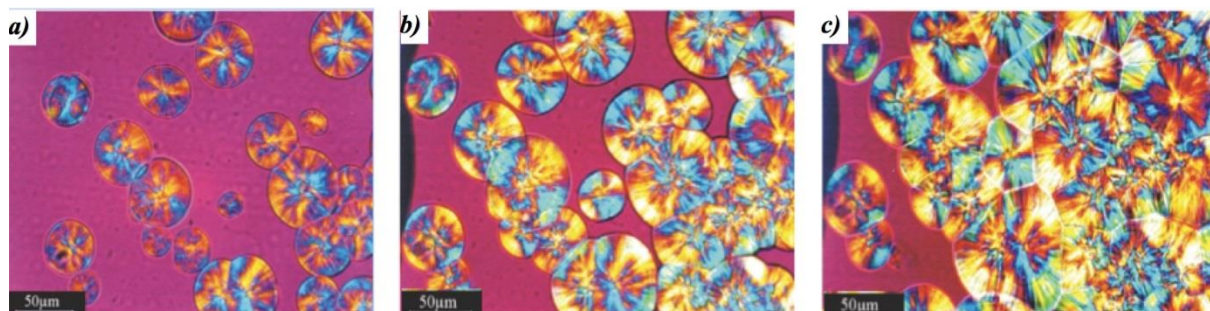
POLYMERY			
REAKTOPLASTY	TERMOPLASTY	TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY	ELASTOMERY
Fenolické	Částečně krystalické, Amorfní	S vysokou tvrdostí	NR (natural rubber)
Melaminové			SBR (Styrene-Butadiene Rubber)
Epoxidové	Amorfní	S nízkou tvrdostí	EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber)
Polyesterové			
Další			Další

2.1.2 CHARAKTERISTICKÉ TEPLoty POLYMERŮ

Termodynamické vlastnosti polymerů jsou závislé především na jejich teplotě. Při zvyšování teploty dochází k zesílení Brownova pohybu částí řetězců. Při dosažení intenzity tepelného pohybu na úroveň mezimolekulárních sil dojde k uvolnění pohybu segmentů, jenž se začnou pohybovat. Tato teplota je označována jako T_g – teplota skelného přechodu. Při zvyšování teploty roste amplituda pohybu segmentů a dochází k jejich pohybu – teplota tečení označována jako T_f . Tato charakteristická teplota se objevuje jen u amorfních polymerů [19, str. 20].

U krystalických polymerů působí větší mezimolekulární síly a teplota T_f amorfních polymerů nemá na strukturu polymeru vliv. Dalším zvyšováním teploty se navyšuje tepelný pohyb segmentů, který překoná mezimolekulární síly a krystalická struktura se rozpadne na viskózní taveninu. Tato teplota se nazývá teplotou tání krystalického podílu T_m . [19, str. 20].

Žádný krystalický polymer ve svém objemu nekrytalizuje na 100 %. Prostor mezi krystalickými segmenty je tvořen amorfni složkou s jejich charakteristickou teplotou T_g . Krystalické polymery jsou tedy ve skutečnosti částečně krystalickými polymery. Gradient teploty se výrazně podílí na tvorbě krystalické složky polymeru, kde rychlejší chlazení snižuje tvorbu krystalů (Obr. 2-1). Rychleji ochlazovaný polymer, blíže ke stěně formy, má tedy nižší obsah krystalické složky oproti polymeru v jádru stěny výstřiku [20].



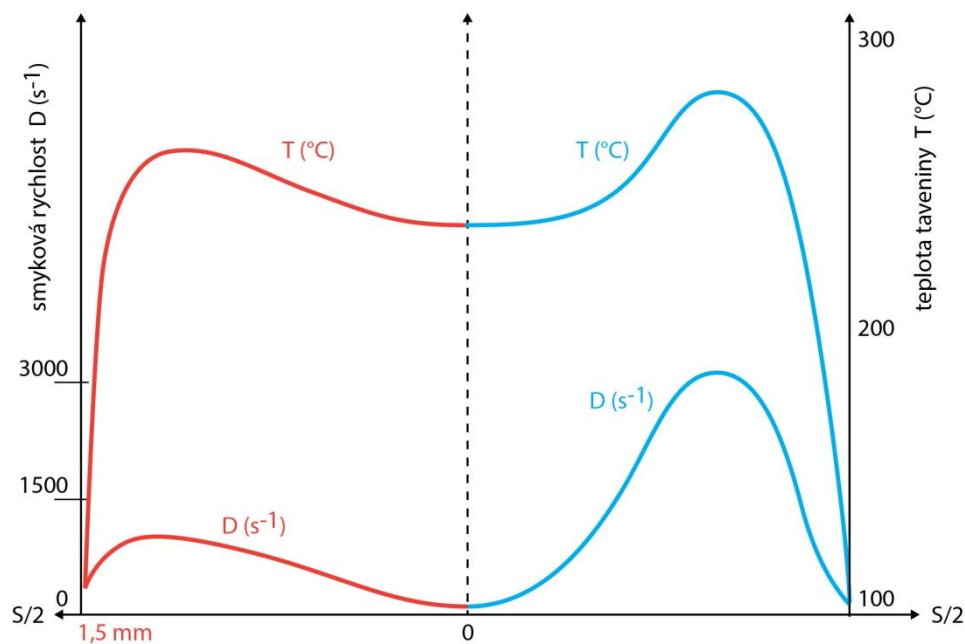
Obr. 2-1: Průběh krystalizace polypropylenu (PP) bez nukleačních činidel při teplotě 473 K [21].

2.1.3 REOLOGIE, DISIPAČNÍ OHŘEV A FONTÁNOVÝ TOK TAVENIN

Tok polymerních tavenin se neřídí newtonským chováním ale tzv. mocninovým zákonem. Jednotlivé druhy polymeru mají zpracovány tzv. tokové křivky založené na smykovém napětí taveniny.

Během toku taveniny se její práce, přesun jednotlivých molekul do jiné polohy, mění v teplo. Tato transformace mechanické energie na energii tepelnou se nazývá

disipace. Výše tvorby disipačního tepla je přímo úměrná součinu smykového napětí a smykové rychlosti. Lze tedy usuzovat, že nejvyššího disipačního ohřevu taveniny bude docházet v místě nejrychlejšího proudění taveniny. K tomu dochází v místech s největším zúžením profilu tokové dráhy. To může vést až k dosažení kritického tepelného bodu T_c , ve kterém dochází k tepelné degradaci polymeru. Protože forma má nižší teplotu, než je teplota taveniny, tak na stěně tokového kanálu tavenina postupně ke středu tokového kanálu tuhne. Tento typ toku se nazývá fontánový [19, str. 20].



Obr. 2-2: Smyková rychlost a teplota po průřezu u plastových dílů s rozdílnou tloušťkou stěny, přepracováno z [21].

2.1.4 PŘÍSADY POLYMERŮ MODIFIKUJÍCÍ VLASTNOSTI

Za účelem dosažení požadovaných vlastností taveniny a polymeru v jeho tuhé formě se používají různé typy aditiv. Dochází tak ke zlepšení tepelné stability, tokových vlastností, rozložení a stupně krystalické struktury u částečně krystalických polymerů, zlepšení mechanických vlastností atd. Tato aditiva se dělí na stabilizátory, plastifikátory, polymerní modifikátory, nukleační činidla, antistatika, retardéry hoření, barviva, pigmenty, optická zjasňovadla, plniva, blendy polymerů [22].

2.1.5 FYZIKÁLNÍ PROCESY POLYMERŮ PŘI VSTŘIKOVÁNÍ

Zpracovávaný materiál se během vstřikovacího cyklu nikdy zcela nedostává do termodynamického rovnovážného stavu. Výsledné vlastnosti výstřiku jsou souhrnem dějů, jimiž prošel během zpracování.

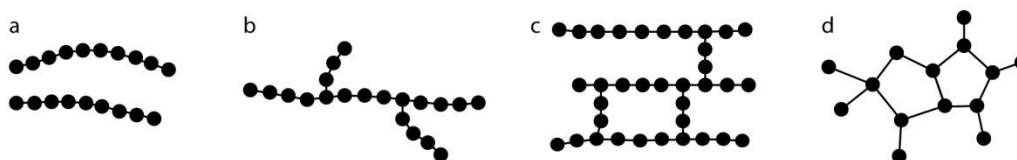
V ideálním případě by se výstřik nacházel v termodynamickém rovnovážném stavu při otevření formy, avšak vzhledem k časovému průběhu vstřikovacího cyklu se v okamžiku otevření formy výstřik nachází v konformacích různě vzdálených od rovnovážného stavu. Protože časový průběh vstřikování neumožňuje dosažení rovnovážného stavu všech řetězců výstřiku, tak výrobek obsahuje tzv. vnitřní pnutí. Tento nerovnovážný stav se nadále po ukončení cyklu mění dle kondicionálních podmínek směrem k rovnovážnému stavu. Ten však nemusí být dosažen bez vzniku defektů výrobku [19, str. 25].

Krystalické polymery mají vzhledem k probíhající změně krystalické mřížky tyto procesy komplikovanější. Např. změny objemu krystalických polymerů jsou vyšší a dochází k nim v menší míře i mimo formu [19, str. 25].

2.1.6 CHARAKTERISTIKA TERMOPLASTŮ

Parametry termoplastů je nutné posuzovat ze dvou různých pohledů a to z pohledu vlastností plastu v tuhém stavu (viz hotový výstřik) a parametrů chování plastů během jejich zpracování (tzn. přechod z tuhého stavu do stavu taveniny). V obou případech je významným faktorem ovlivňující vlastnosti plastu a jeho chování teplota [19, str. 16].

Termoplasty jsou syntetické polymery tvořeny makromolekulami skládající se z opakujících základních jednotek nazývaných mer neboli monomer. Monomer je jednoduchá molekula. Kopolymery jsou poté složeny z jednoho a více typů základních jednotek. Polymery mohou nabývat tří struktur dle uspořádání makromolekul – lineární, rozvětvené a síťované (Obr. 2-3). Uspořádání je ovlivněno chemickým složením, druhem atomů a jejich vazbami mezi nimi. Tyto aspekty udávají chemické a fyzikální vlastnosti polymeru [19, str. 16].



a) lineární b) rozvětvené c) spoje mezi řetězci d) síťované

Obr. 2-3: Schematické uspořádání makromolekul, přepracováno z [23].

2.1.7 NADMOLEKULOVÁ STRUKTURA TERMOPLASTŮ

Polymery v pevném stavu mohou mít různé optické, chemické a další fyzikální vlastnosti. Dle jejich struktury mohou být polymery transparentní, průsvitné, mléčně zakalené, křehké či elastické. Tyto vlastnosti se odvíjí od nadmolekulové struktury polymeru, tzn. uspořádání makromolekul v polymeru [20].

Především lineární a málo větvené polymery jsou schopny částečné krystalizace. Částečná krystalizace znamená, že polymer není v celém objemu zesíťován, ale část objemu mezi krystalickou částí tvoří amorfnní struktura. Krystalickou část tvoří makromolekuly složené do prostorové struktury tvořící lamely – destičkové útvary tloušťky cca 10 nm. Z lamel se dendritickým způsobem tvoří kulové útvary tzv. sferolity [19, str. 19].

Amorfnní strukturu charakterizuje tzv. statické klubko makromolekul. Je to neuspořádaný útvar makromolekul po přechodu z kapalného do pevného stavu. Ve stavu taveniny jsou všechny polymery amorfnní tzn. mají neuspořádanou strukturu.

Molekuly jsou k sobě v obou fázích přitahovány mezimolekulárními silami. Intenzita těchto sil charakterizuje mechanické vlastnosti polymeru a je nepřímo závislá na vzdálenosti molekul. Krystalická fáze má oproti amorfnní menší vzdálenost mezi molekulami a tedy vyšší mechanické vlastnosti, avšak během krystalizace dochází ke zmenšení objemu – smrštění [19, str. 19].

Mezi částečně krystalické polymery patří PE, POM, PA, PET, PBT, LCP, PPS atd. Obvykle jsou neprůhledné. Do amorfnních polymerů se řadí PS, SB, SAN, SBS, ASA, ABS, MABS, PMMA, PC, PES atd. Smrštění částečně krystalických polymerů je 1 až 3,5 %. Smrštění amorfnní fáze činí 0,2 až 0,8 % a obvykle jsou polymery transparentní [21].

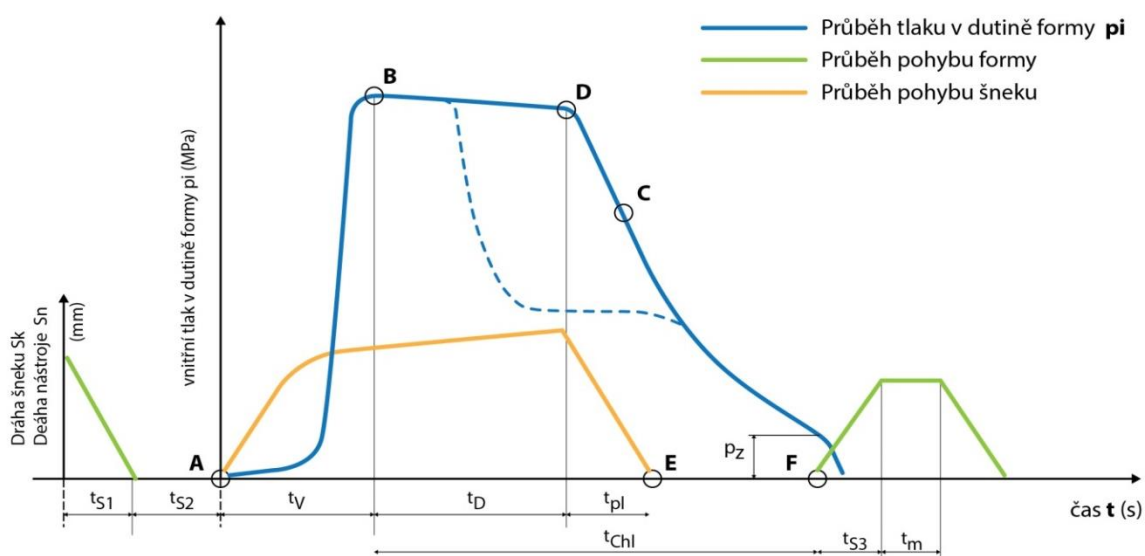
Tabulka 3: Stupeň krystalinity a rychlost růstu krystalitů pro vybrané polymery [21].

Termoplast	Stupeň krystalinity [%]	Rychlost růstu sferolitů [$\mu\text{.min}^{-1}$]
PA 6	35 až 45	200
POM	70 až 85	400
PET	30 až 40	7
PP	70 až 80	20
HDPE	70 až 80	2000

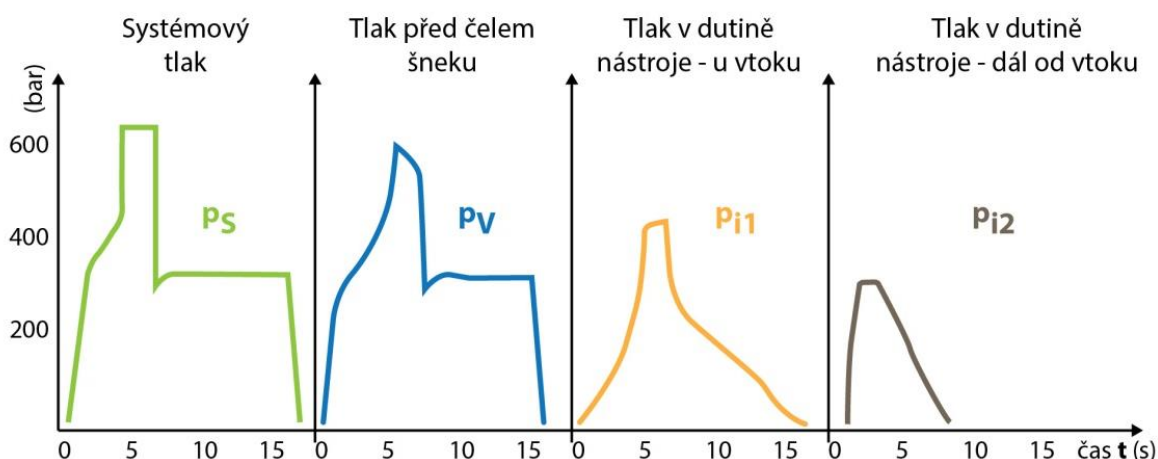
2.1.8 SMRŠTĚNÍ TERMOPLASTŮ

2.1.8.1 PRŮBĚH TLAKU BĚHEM VSTŘIKOVACÍHO CYKLU

Vstřikovací cyklus je zahájen při prázdné a otevřené dutině formy. V čase nula se zahajuje vstřikovací cyklus. Forma se uzavře a „uzamkne“. Tato část je označena jako t_{s1} . Šnek se v tavící komoře v bodě A dává do pohybu a začíná vstřikování roztavené hmoty do dutiny a jako doba vstřikování se označuje t_v . Během plnění narůstá tlak v dutině formy až do bodu B, kde dosahuje maxima. Dutina je v této fázi vyplněna na cca 95 až 97 %. Během vstřikování šnek vykonává pouze axiální pohyb a plní roli pístu. Až do otevření formy a vyhození výstřiku trvá doba chlazení a je označena jako t_{ch} . Během chlazení dochází ke smrštění vstřikované hmoty a objemové změny je nutné kompenzovat dotlačením taveniny do dutiny formy. Tato doba je tzv. dobou dotlaku t_d , při které může být tlak stále maximální nebo se může po krátké době začít snižovat. Dotlak může být tedy *izobarický*, při kterém je zachován konstantní tlak, nebo *izochorický* při zachování konstantního objemu. V bodě D je ukončena fáze dotlaku. Bod C označuje moment zatuhnutí roztavené hmoty ve studeném vtokovém kanálu. Aby bylo možné nadále dotlačovat je nutné, aby před čelem šneku zůstal určitý objem plastu tzv. polštář. Na tento šnek dále svým čelem působí. Po dotlaku dochází k plastikaci nové dávky plastu označené úsekem t_{pl} . Šnek se otáčí, nabírá granulovanou hmotu a postupuje směrem dozadu za stálého promíchávání plastifikované hmoty. Tlak ve formě nadále postupně klesá až na úroveň p_z . Příliš vysoký zbytkový tlak v bodě F by způsobil vysoké pnutí ve výstřiku. V bodě F se forma otevře a výstřik se vyhodí [21].



Obr. 2-4: Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování, přepracováno z [21].



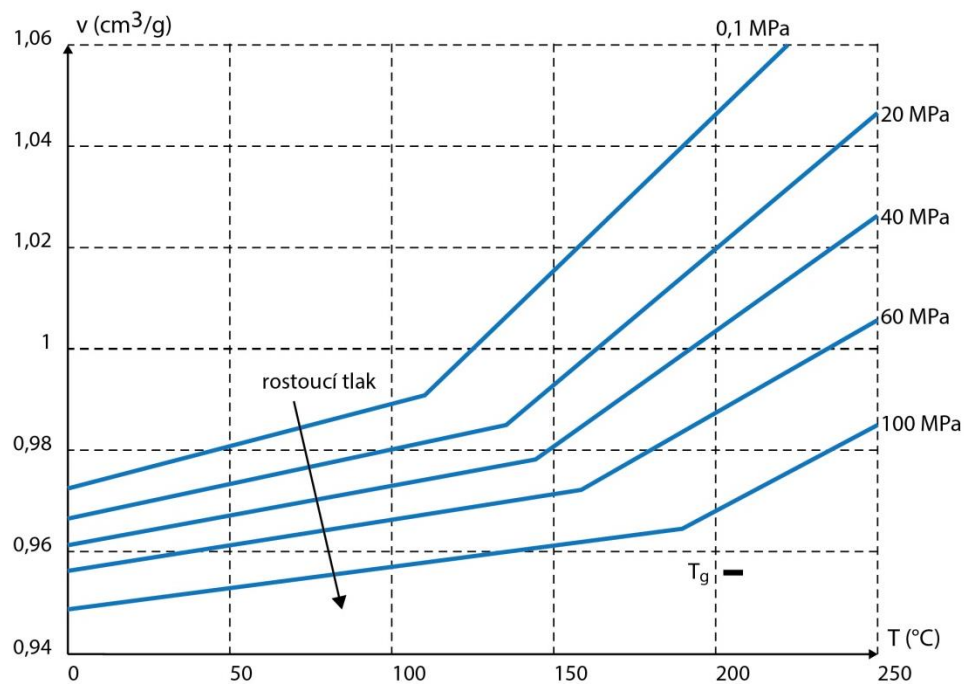
Obr. 2-5: Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování,
 přepracováno z [21].

2.1.8.2 DEFINICE, TEPELNÁ KONTRAKCE, PVT CHOVÁNÍ

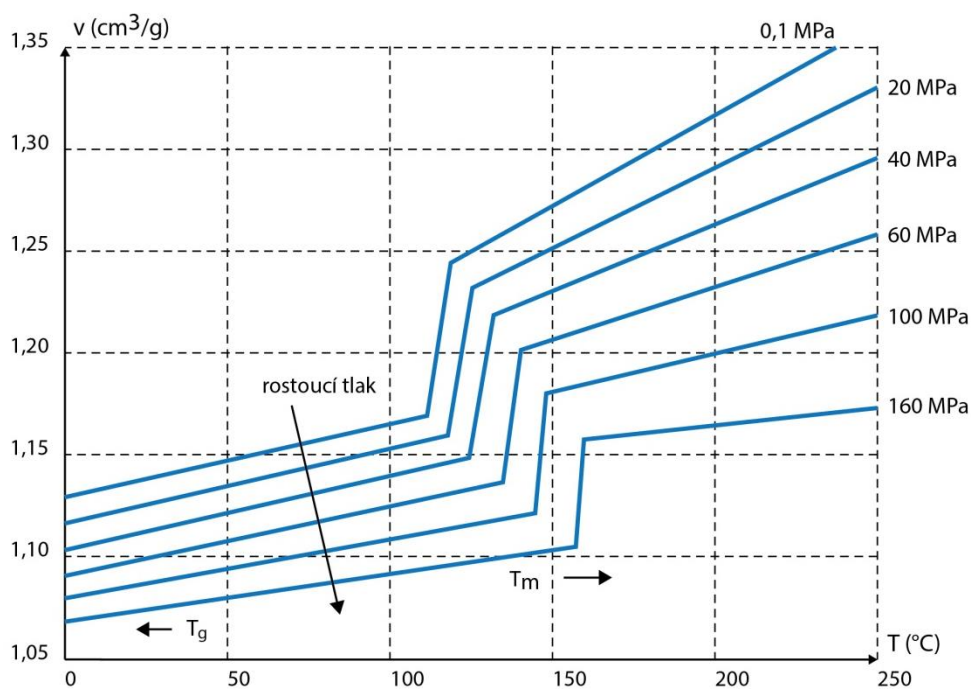
Smrštění je proces, při němž dochází ke změně objemu výrobku v čase. V případě plastů se tento fenomén objevuje u všech vstřikovaných výrobků amorfních či krystalických polymerů. Objem výstřiku po vyhození z formy je menší než objem formy a objem výrobku po vyhození z formy není stejný jako objem výrobku po kondicionační době. Smrštění může vést k deformaci, při které dojde ke změně tvaru výrobku při zachování jeho objemu [19, str. 28].

Tepelné smrštění je ovlivněno působením vnitřního pnutí ve výstřiku, krystalizačními pochody krystalických struktur, zadržení smrštění mechanickými překážkami ve formě a rozdílnou teplotou taveniny v dávce v podélném i příčném směru. Rovněž proces chlazení není v dutině formy konstantní. Vrstva výstřiku blíže k povrchu formy chladne rychleji než vrstvy směrem ke středu tloušťky výstřiku. Při výpočtu délky chlazení je tloušťka stěny výstřiku ve druhé mocnině, a tedy dvojnásobná tloušťka stěny výstřiku prodlužuje dobu chlazení čtyřikrát. V menší míře se gradient chlazení mění v příčném a podélném směru formy.

Průběh smrštění ve vztahu k termodynamickým pochodům dobře popisuje p_vT diagram příslušného vstřikovaného materiálu (Obr. 2-6 a 2-7). Změna stavových veličin p_vT diagramu – tlak, objem a teplota dle místa měření ve výstřiku předznamenává různé smrštění a konečné vlastnosti výstřiku v těchto místech [19, str. 29].

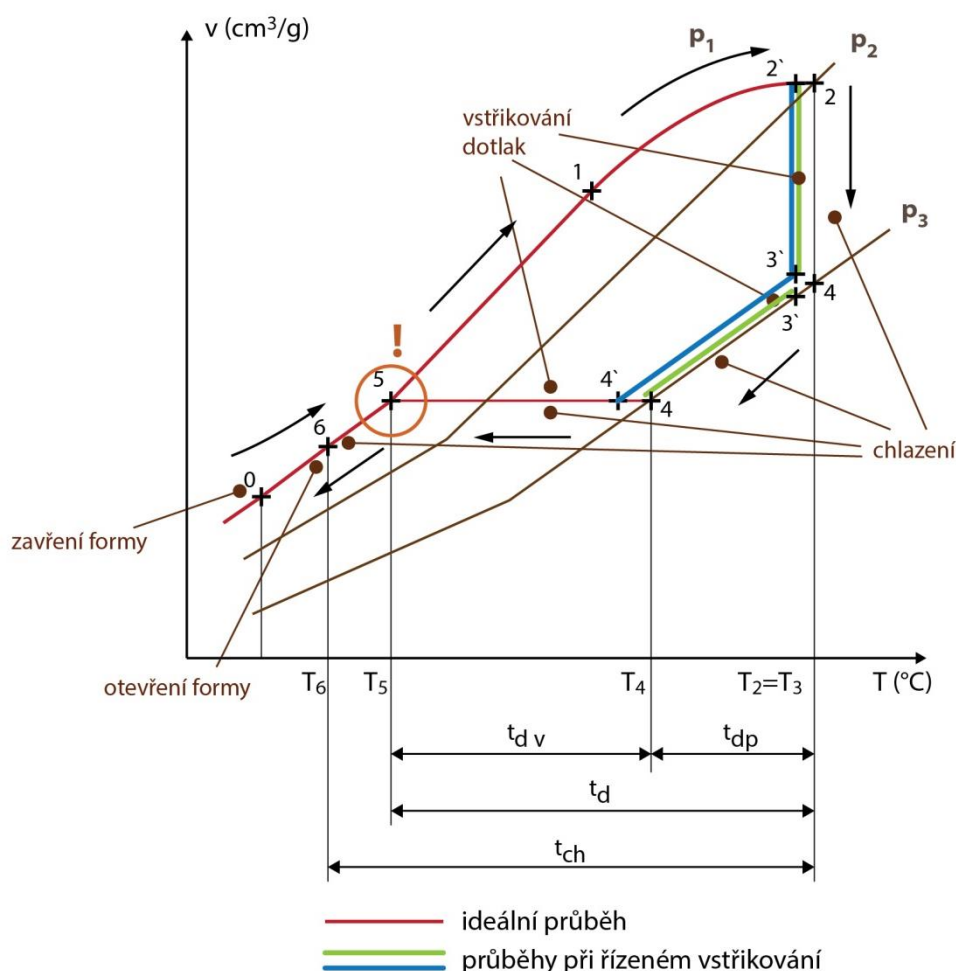


Obr. 2-6: pvT diagram amorfního termoplastu, přepracováno z [21].



Obr. 2-7: pvT diagram částečně krystalického termoplastu, přepracováno z [21].

pvT diagramy mají však své limity. Nezohledňují časový průběh a místo hodnocení v dutině formy. Rozdílný gradient chlazení má výrazný vliv na stupeň krystalinity, a tedy i na smrštění u částečně krystalických materiálů. Dále není v pvT diagramu zohledněna rozdílná tloušťka stěn. Na smrštění má výrazný vliv průběh vstřikovacího cyklu a to především fáze dotlaku (Obr. 2-8) [19, str. 30].



Obr. 2-8: Vstřikovací cyklus v p – v – T diagramu, přepracováno z [21].

Výrobní objemové smrštění S_v je v praxi nejdůležitějším faktorem. K této objemové změně dochází mezi body 4 - 6. Výrobní objemové smrštění je možné určit ze vztahu:

$$S_{VV} = \frac{V_F - V_V}{V_F} \quad [19, \text{str. 31}]. \quad (2)$$

V_F – objem tvarové dutiny formy při teplotě okolí 23 °C,

V_V – objem výstřiku při teplotě okolí 23 °C.

Směrové smrštění je možné určit ze vztahu:

$$S_{VV} = 1 - (1 - S_D)(1 - S_S)(1 - S_{TL}) \quad [19, \text{str. 31}]. \quad (3)$$

S_D – smrštění ve směru délky,

S_S – smrštění ve směru šířky,

S_{TL} – smrštění tl. stěny.

V praxi se především při návrhu vstřikovací formy uplatňuje znalost lineárního smrštění vyjádřeného vztahem:

$$S_L = \frac{L_F - L_V}{L_F} \quad [19, \text{str. 32}]. \quad (4)$$

S_L – lineární smrštění,

L_F – rozměr formy při teplotě 23 °C,

L_V – rozměr výstřiku při teplotě 23 °C.

Dalším užívaným vztahem k odvození smrštění jsou vztahy odvozené z měření reálných výstřiků při znalosti objemového smrštění.

Smrštění tloušťky:

$$S_{TL} = (0,9 \text{ až } 0,95)S_{VV} \quad [19, \text{str. 32}]. \quad (5)$$

Smrštění ve směru délky, resp. šířky:

$$S_{D/S} = (0,1 \text{ až } 0,05)S_{VV} \quad [19, \text{str. 32}]. \quad (6)$$

S_{VV} – objemové výrobní smrštění,

S_{TL} – smrštění ve směru tloušťky stěny,

$S_{D/S}$ – smrštění ve směru délky nebo šířky.

V praxi se vychází z tabulkových hodnot smrštění pro příslušné vstřikovací granuláty zjištěné z měření definovaných normou ISO 294-4 Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastů. Hodnota výrobního smrštění výstřiku se určuje z rozměrů výstřiku uskladněného v suchém prostředí při teplotě 23 °C v rozmezí 16 až 24 hod.

Definice výrobního smrštění S :

$$S = \frac{L_F - L_V}{L_F} \cdot 100 \quad [19, \text{str. 34}]. \quad (7)$$

Při delším uskladnění popř. vyšších teplotách se hovoří o dosmrštění a konkrétní podmínky jsou smluvní. Dosmrštění je výsledkem uvolnění vnitřního pnutí, reorientace molekul a případná dokrystalizace částečně krystalických materiálů. Tato hodnota může být v případě nevhodných parametrů vstřikovacího procesu vysoká.

Definice dosmrštění S_P :

$$S_P = \frac{L_V - L_{VP}}{L_F} \cdot 100 \quad [19, \text{str. 34}]. \quad (8)$$

L_F – rozměr formy při teplotě 23 °C,

L_V – rozměr výstřiku při teplotě 23 °C (měřený v čase 16 až 24 h po vyhození z formy),

L_{VP} – rozměr výstřiku po delším skladování a vyšších teplotách.

Pro výpočet rozměru formy při známé hodnotě výrobního smrštění je možné určit rozměr formy z empirického vzorce:

$$L_F = L_V + L_V \cdot S + L_V \cdot S^2 \quad [19, \text{str. 35}]. \quad (9)$$

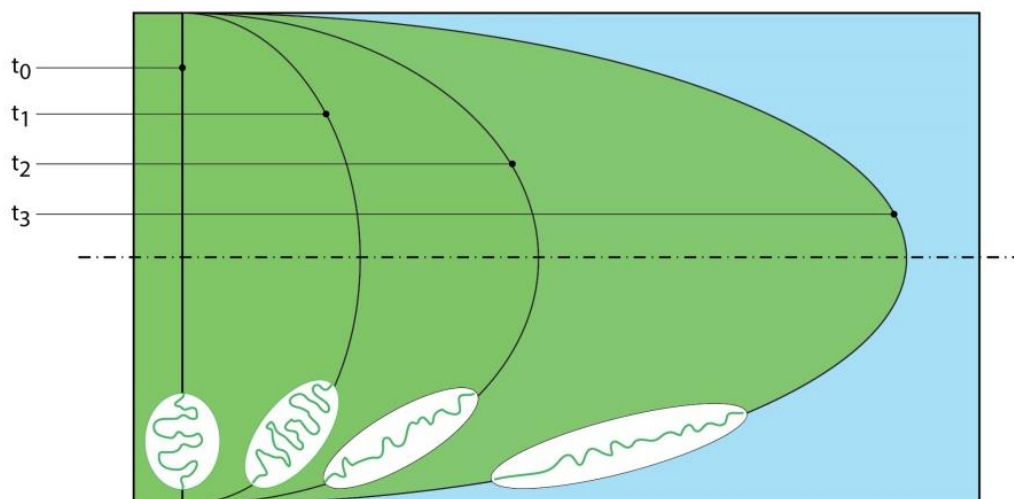
L_F – rozměr formy [mm],

L_V – rozměr výstřiku [mm],

S – výrobní smrštění výstřiku [mm/mm].

2.1.8.3 VLIV GEOMETRICKÉHO TVARU

Vlivem rozdílného tvaru výstřiku od vtoku v souvislosti s tokem taveniny dochází k anizotropii smrštění – rozdílné smrštění v podélném a kolmém směru ke směru toku taveniny. Tento jev souvisí s rozdílnou orientací a „rozbalení“ makromolekul v závislosti změn smykových sil a smykové rychlosti v tokovém kanálu (Obr. 2-9) [21].



Obr. 2-9: Vliv smykové rychlosti na intenzitu „rozbalení“ makromolekul, přepracováno z [21].

Geometrie výstřiku ovlivňuje rovněž intenzitu chlazení se vzdáleností od ústí vtoku. S větší vzdáleností do vtoku klesá teplota taveniny a čelo tuhne. Ve vztahu ke stěně formy je vztah opačný. Tavenina blíže ke stěně je ochlazována intenzivněji a tuhne rychleji.

Výše uvedené jevy přispívají k anizotropii smrštění a následně deformaci výstřiku [21].

2.1.8.4 REDUKCE SMRŠTĚNÍ

Výrazný teplotní gradient profilu tloušťky výstřiku vyžaduje minimalizaci změn průřezu - tloušťek výstřiku, která by způsobila rozdílné smrštění.

Dále je nutné volit ústí vtoku formy tak, aby umožňovalo postupný lineární tok čela taveniny bez „přebíhání“ kritickými částmi formy. V případě umístění více vtoků do vstřikovací formy je nutné optimalizovat jejich polohu za účelem minimalizace vzniku studených spojů. Vhodná velikost ústí vtoku umožňuje optimalizovat tlakovou odezvu a tak snížit smrštění [19, str. 55].

AMORFNÍ POLYMERY

Oproti částečně krystalickým materiálům smrštění pod 1 % vystačí s kratším dotlakem, ale vyžadují delší dobu tuhnutí. Smrštění amorfních polymerů ovlivňují především teplotní děje.

Vliv procesních parametrů:

- homogenní teplota taveniny,
- temperace formy – temperační kapalina na vstupu a výstupu z formy má být cca 3 až 5 °C do plusu,
- rychlé chlazení vyvolá silnou orientaci makromolekul na povrchu a tím i silné vnitřní pnutí v obou směrech. Rovněž se zhoršuje i povrchový vzhled,
- pomalé chlazení je vhodnější pro redukci vnitřního pnutí a kvalitnějšího povrchu výstřiku [19, str. 55].

ČÁSTEČNĚ KRYSTALICKÉ POLYMERY

Vyžadují kratší dobu tuhnutí. Po skončení fáze dotlaku je možné výstřik z formy vyhodit. Je žádoucí minimalizovat dosmrštění výstřiku mimo formu. To je možné nastavením vhodných procesních parametrů.

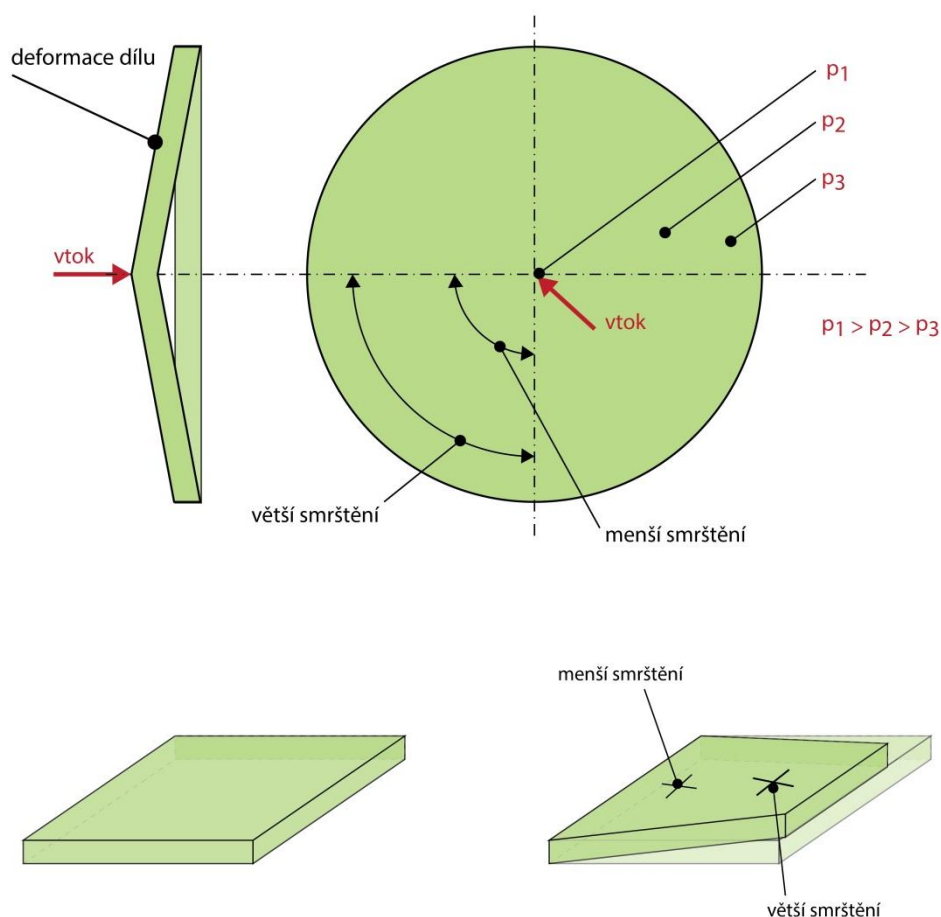
Vliv procesních parametrů:

- oddálení zamrznutí taveniny, resp. vyšší teplota formy a pomalejší chlazení zvyšuje stupeň krystalinity během cyklu vstřikování ve formě a tím menší změny struktury po vyhození tzn. menší dosmrštění. Zároveň vznikem větších krystalických útvarů narůstá možnost výskytu lomových poruch.
- vyšší teplota formy a oddálení zamrznutí umožňuje použít vyšší dotlakovou fázi, zvýšit objem dopravené taveniny a snížit objemové smrštění.
- nižší teplota formy znamená menší krystalické útvary, menší výrobní smrštění, větší vnitřní pnutí a dosmrštění.
- větší ústí vtoku rovněž napomáhá lepšímu objemovému naplnění snížením odporu toku a smykového namáhání [19, str. 55, 56].

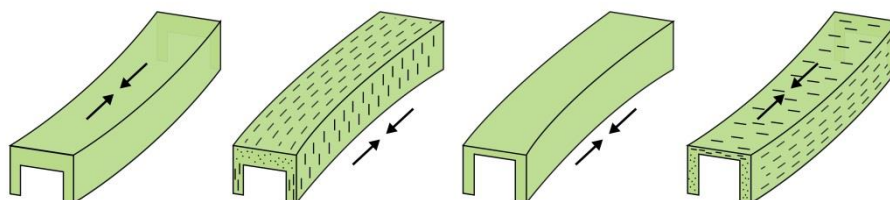
2.1.8.5 SMRŠTĚNÍ A DEFORMACE

Deformace je výsledný jev řady parametrů. Především potom různých složek celkového smrštění (např. anizotropie smrštění v důsledku směru toku taveniny popř.

orientace vláken plniva, různé smrštění dle tloušťky stěny, lokální změny teploty popř. různé působení dotlakové fáze). Částečně krystalické materiály, především plněné vláknitým plnivem, mají v porovnání s amorfními větší smrštění a tedy i výskyt deformací viz Tabulka 4. Smrštění ve směru vláken je menší než ve směru kolmém na vlákna (Obr. 2-10 a 2-11) [21].



Obr. 2-10: Anizotropie smrštění v důsledku orientace, přepracováno z [21].



Obr. 2-11: Anizotropie smrštění výstřiků u neplněných a plněných materiálů, přepracováno z [21].

Tabulka 4: Smrštění v podélném a příčném směru dle typu plniva [21].

Termoplast	Typ plniva	Smrštění v podélném směru [%]	Smrštění v příčném směru [%]
PA 6	neplněný	1,2	1,4
PA 6	minerální plnivo	1,2	1,2
PA 6	30% skleněných vláken	0,2	0,8

2.1.8.6 VNITŘNÍ PNUTÍ

Dělíme do pěti základních typů:

- tepelné – zamrzající profil od vnější vrstvy výstřiku směrem ke středu způsobuje na povrchu tlakové napětí, směrem ke středu pak přechází v tahové pnutí.
- tlakové – klesající tlakový gradient směrem od vtoku do vzdálenější části formy způsobuje rozdílné stlačení taveniny.
- nehomogenní orientace – vzniká rozdílnou orientací makromolekul v závislosti na směru a průběhu toku taveniny. Oblasti s různou orientací makromolekul mají různý průběh tepelné roztažnosti.
- pnutí deformační – může být do výstřiku vneseno během vyhazování výstřiku z formy mechanickým namáháním.
- pnutí krystalizační – různý stupeň krystalinity v jednotlivých vrstvách a oblastech výstřiku [19, str. 61].

2.1.9 CHARAKTERISTIKA REAKTOPLASTŮ

Reaktoplasty se zásadně liší svými vlastnostmi od termoplastů svoji nevratnou chemickou reakcí nazývanou vytvrzování, při níž polymer přejde z lineární struktury do zesíťovaného stavu. Tímto se stává polymer netavitelný a nerozpustný.

2.1.9.1 DĚLENÍ REAKTOPLASTŮ

Tabulka 5: Dělení reaktoplastů [24].

REAKTOPLASTY				
Fenoplasty	Aminoplasty	Epoxidy	Polyestery	Polyuretany

FENOPLASTY

Nazývají se rovněž fenolické pryskyřice. Vznikají polykondenzací fenolu s aldehydy. Používají se především jako lisovací materiál při teplotě tání 70 až 105 °C. Fenoplasty síťují působením teploty nebo chemickou reakcí vytvrzovacích aditiv. V čisté podobě jsou křehké, a proto se přidává plnivo působící jako vyztužení. Plniva mohou být organická (např. dřevitá moučka, útržky tkanin) nebo anorganická (břidličné moučky, grafit atd.). Vysoká polarita způsobuje vysoké dielektrické ztráty. Dobře odolávají rozpouštědlům, kyselinám a povětrnostem.

Kromě lisování se používají jako pojivo brusných kotoučů nebo pískových forem. Dále se využívají na lamináty jako pojivo vyplňujících vrstev. Protože nesesíťovaná část fenolu je zdraví škodlivá, tak jej není možné používat jako obaly potravin apod. [24].

AMINOPLASTY

Tzv. aminopryskyřice vznikají kondenzací látek obsahující aminoskupiny – NH_2 s aldehydy. Účinkem tepla popř. vytvrzovacích látek dochází k zesíťování. Jsou bezbarvé a dosahují vyšší tuhosti než fenoplasty. Jsou bezbarvé a zdravotně nezávadné.

Používají se jako nevytvrzené pro aplikaci na různé materiály např. při laminaci a následně se vytvrzují, nebo jako lisovací hmoty [24].

EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE

Obsahují obvykle více epoxidových skupin. Jsou zpravidla bezbarvé až nažloutlé v tekutém i pevném stavu. Reagují s velkým množstvím sloučenin jako vytvrzující přísada. Mají dobrou přilnavost k širokému spektru materiálů, dobrou chemickou odolnost a malé smrštění.

Epoxidové pryskyřice mají široké využití. Používají se jako lepidla, nátěrové podlahové hmoty, zalévací a lisovací pryskyřice, pojivo matric, konstrukční materiál v letectví atd. [24].

POLYESTEROVÉ PRYSKYŘICE

Jsou to nenasycené polyestery rozpuštěné v reaktivním monomeru schopného kopolymerace. Za pomoci urychlovače reakcí dojde k vytvrzení.

Ve stavebnictví se využívají na lité podlahy, na výrobu umělého mramoru a obkladaček jako pojivo. Dále jako lepidlo, nátěrové a zalévací hmoty. Rozšířené jsou

jako pojivo matric laminátových materiálů, nejčastěji matrice ze skleněných vláken, pro např. střešní krytiny a lodě [24].

POLYURETANY

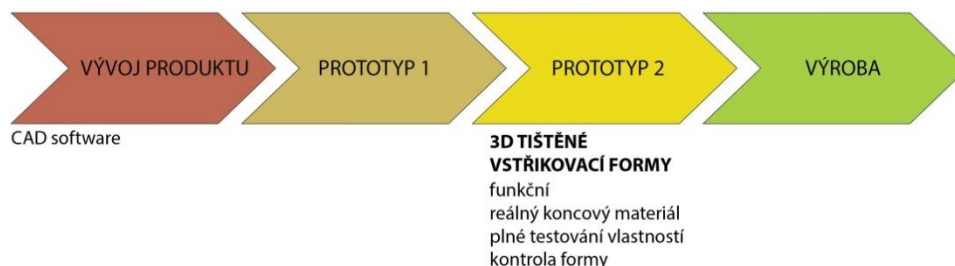
Různým poměrem vstupních chemikálií (isokyanáty, polyalkoholy) a aditiv může zaujmout strukturu semikrystalického termoplastu nebo sesíťovaného reaktoplastu a elastomeru.

Nejrozšířenějším využitím jsou pěnové materiály o různé hustotě. Reakcí vstupních chemikálií vzniká nadouvadlo (oxid uhličitý). Reakce probíhá rychle, a tak je možné výrobek po cca 15 min. vyjmout z formy. Tyto pěnové materiály, které mohou být i tuhé (tzv. integrální pěny), mají široké využití od automobilového průmyslu po stavebnictví [24].

2.1.10 TIŠTĚNÁ VSTŘIKOVACÍ FORMA & VSTŘIKOVÁNÍ

3D tisk patří do tzv. skupiny RP, ve volném překladu rychlá výroba prototypů. Proces vývoje nového produktu (NPD – new product development) se i přes značný rozvoj CAD programů neobejde bez ověření si virtuální vize na reálném výrobku. V tomto bodě vývoje má 3D tisk nezastupitelnou roli, i když se jedná v celé životnosti produktu jen o zlomek času (Obr. 2-12).

Přímá výroba prototypu 3D tiskem je v některých případech nevhodná. Především pokud je nutné ověřit mechanické vlastnosti výrobku, je nutné použít autentický materiál finálního produktu. Rovněž molekulová struktura materiálu by měla odpovídat následně sériově vyráběnému výrobku. Množství polymerů pro 3D tisk je do jisté míry omezen a především molekulová struktura se liší od výrobku vyhotoveného vstřikováním plastů do formy sériové výroby. Doposud se k výrobě prototypu vstřikováním plastů používala forma vyrobená obráběním z hliníku, která obsahovala jen z části nebo vůbec funkční prvky jako např. vačky, vyhazovače apod. I když jsou náklady pro výrobu hliníkové formy pro prototypovou výrobu podstatně nižší než jejich obdoba vyrobená z oceli, tak je to výrazná investice pro většinu výrobních podniků. Rovněž doba vyhotovení hliníkové formy je v procesu vývoje nového produktu značná. 3D tisk nachází uplatnění i při výrobě vstřikovací formy prototypové série.

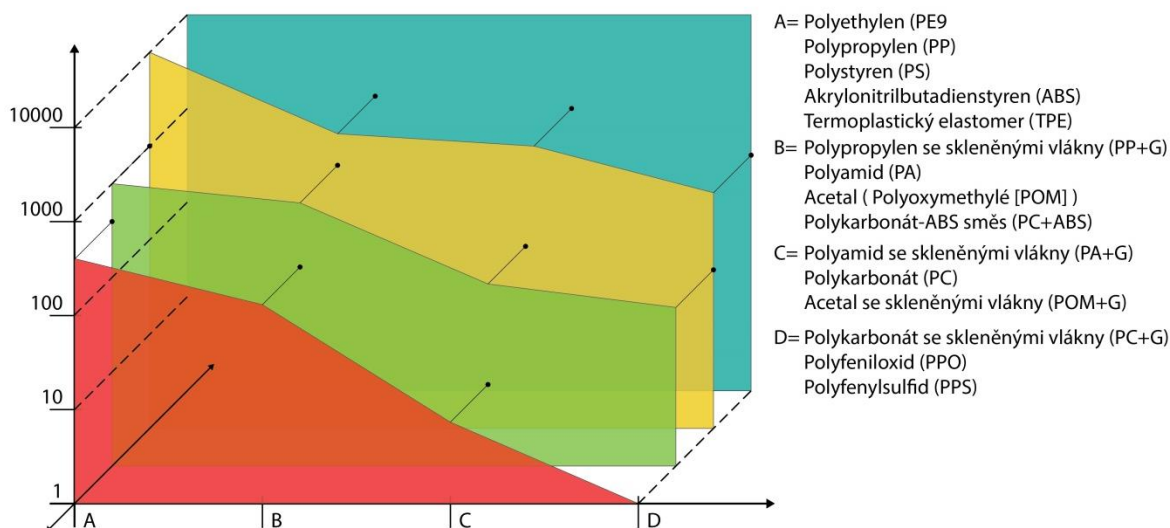


Obr. 2-12: Fáze uplatnění tištěné vstřikovací formy, přepracováno z [26].

2.1.10.1 MATERIÁLY PRO VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ DO TIŠTĚNÉ FORMY

Materiál použitý pro vstřikování má významný vliv na životnost nástroje a kvalitu výstřiku (Obr. 2-13). Teplota, viskozita a abraze vstřikovaného materiálu určují životnost nástroje. Se stoupajícími hodnotami těchto faktorů klesá životnost nástroje. U vysoce viskózních polymerů se doporučuje vstřikovat za vysokého tlaku. Polymerní nástroje vyrobené 3D tiskem však nejsou uzpůsobeny pro tak vysoký tlak. Je tedy vhodné využívat polymery s vhodnými reologickými vlastnostmi odpovídajícími limitnímu tlaku polymerové formy a tvaru vstřikovaného dílu [25].

Termoplasty užívané pro vstřikování je možné rozdělit na základě obtížnosti zpracování do tří skupin. Dle skupiny je možné předem určit přibližnou životnost nástroje a doporučený tvar vstřikovaného tvaru. Termoplasty vyžadující vstřikovací teplotu vyšší a to až do 300 °C (570 °F) je možné použít i pro polymerní formy. Vhodnější jsou však termoplasty s nižší teplotou tání jako např. polypropylen (PP) nebo polyetylen (PE) s teplotou tání 120 až 180 °C. Nižší teplota snižuje zatěžování formy a zvyšuje její životnost. Mezi méně vhodné termoplasty patří kompozitní plasty plněné skleněným vláknem apod., které se vyznačují vyšší abrazí, nebo některé termoplasty v čisté podobě jako např. PPO, PPS pro jejich obtížné zpracování a nároky na kvalitu formy a řízení teplotního gradientu [25].



Obr. 2-13: Životnost nástroje dle vstřikovaného materiálu,
 přepracováno z [25].

2.1.10.2 NÁVRH FORMY

Obdobné principy jako při návrhu ocelové formy mohou být použity i pro formu tištěnou. Je ovšem nutné provést jisté úpravy vzhledem k jiným statickým a termodynamickým vlastnostem tištěné polymerové formy [25].

2.1.10.3 DUTINA FORMY

Úkosity je nutné aplikovat pro možnost vyhození výstřiku z formy a snížení možnosti jeho poškození. Je doporučeno navýšení úkosu na 5° . Ostré úhly obzvláště u tenkých profilů je vhodné nahradit malým zaoblením cca 0,2 mm. Tím dojde k lokálnímu snížení vnitřního pnutí a snížení možnosti pozdějších deformací apod. Zatékání do dělicí roviny formy se u tištěných forem dosahuje uzavíracím tlakem vstřikovacího stroje. Stlačením formy se dělicí rovina uzavře malou kompresí materiálu formy [25].

V případě využití ocelové základny pro vložení tištěné formy se doporučuje zadní stranu formy navýšit o 0,2 mm, a tak formu udělat mírně vyšší než kapsa základny. To zaručuje dobré dolehnutí tvárnice a tvárníku.

U vedlejších dělicích rovin malé hloubky (cca 6 mm), téměř kolmých k pohybu vizformy, není nutná úprava styčných ploch. V jiném případě se styčné plochy vzhledem k normále plochy posunou o 0,05–0,1 mm [25].

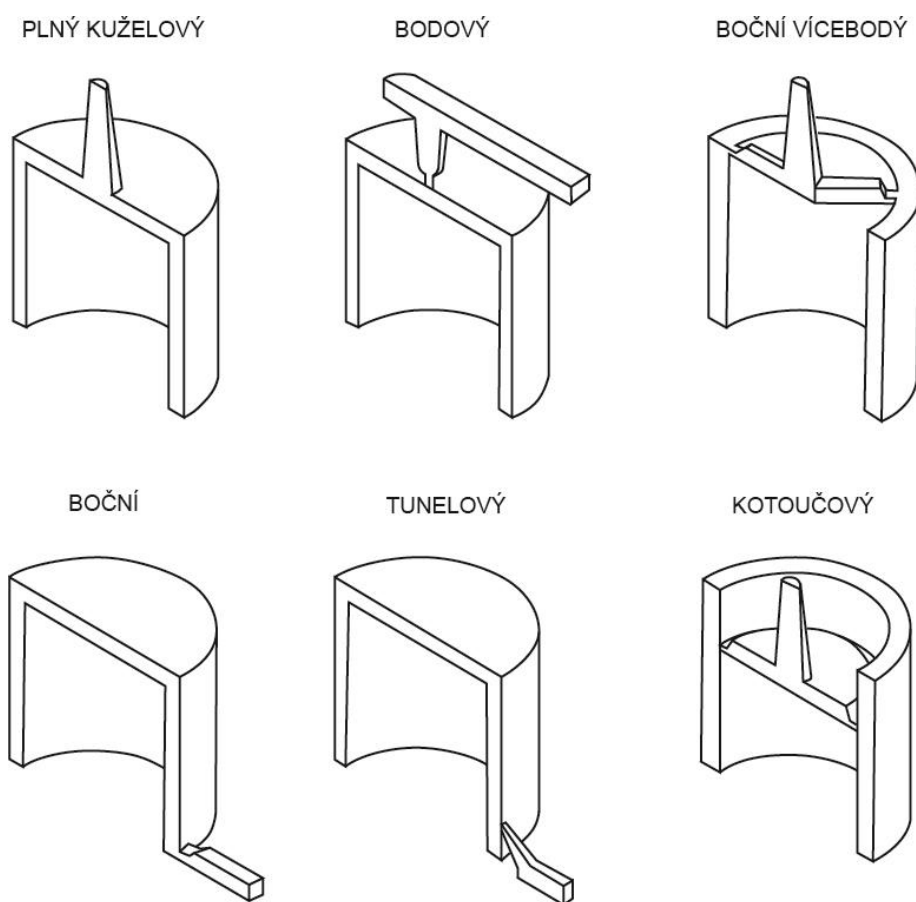
Pro čepy, které mají větší poměr výšky a průměru než 3:1 by se měly použít ocelové náhrady čepů zasazené do připravených otvorů. Otvory se připravují o 0,1 mm větší, než je průměr čepu. Díry menšího průměru než 0,8 mm je vhodnější

následně vyvrtat. Před tiskem formy je vhodné zvětšit tvárník a tvárnici formy úměrně ke smrštění vstřikovaného termoplastu během chladnutí [25].

2.1.10.4 SOUČÁSTI FORMY

VTOKOVÉ ÚSTÍ

Nevhodné jsou bodové a tunelové ústí způsobující různé vady při tečení termoplastu. Pro snížení tlaku ve formě je vhodné zvětšit vtokové ústí v souladu s reologickými vlastnostmi použitého termoplastu. Obecně se vtokové ústí tvoří 2x až 3x větší než v případě ocelové formy. Tloušťka štěrbinového ústí se dělá stejné tloušťky jako tloušťka stěny v místě vtoku. Doporučené je používat kruhové ústí kuželového vtoku průměru 5 až 8 mm pro formy menší než 100 x 50 x 25 mm, s tloušťkami stěn 1 až 2 mm a polymer s dobrými tokovými vlastnostmi. V případě horších tokových vlastností se vtok provádí v průměru 8 až 9 mm [25, 28].



Obr. 2-14: Vtokové ústí, přepracováno z [29].

VTOKOVÉ KANÁLY

Není nutná speciální úprava oproti ocelové formě [25].

VTOK

Nedoporučuje se přímý kontakt mezi tryskou vstřikovacího stroje a tištěné formy. Vtok je vhodné umístit do ocelové základny nebo vytvořit otvor pro vložení vtokové vložky. Pro vložení vložky se otvor připraví menší o 0,2–0,3 mm a během montáže se rozšíří [25].

VYHAZOVACÍ SYSTÉM

V případě instalace vyhazovacího mechanismu se otvory pro vyhazovače připraví o 0,2–0,3 mm menší a během instalace formy se rozšíří na požadovaný průměr [25].

CHLADICÍ SYSTÉM

Vzhledem k termodynamickým vlastnostem polymerních látek užitých při tisku formy nemá chladicí systém příliš velký efekt na délku vstřikovacího cyklu nebo na kvalitu výstřiku. Je možné však zvýšit životnost formy o cca 20 %. Průměr chladicích kanálů je 6 až 8 mm a vzdálenost od povrchu dutiny 8 až 10 mm. Návrh trasování kanálů musí brát v úvahu potřebu odstranit podpůrný materiál po vytištění formy. Alternativou je chladicí kanály dodatečně vyvrtat [25].

UCHYCENÍ FORMY

Tištěné formy se uchycují na ocelovou desku nebo se vsazují do dutiny ocelové základny formy. Vsazení do dutiny je vhodnější. Následující tabulka 6 stručně ukazuje výhody a nevýhody obou metod [25].

Tabulka 6: Výhody a nevýhody různých uchycení forem [25].

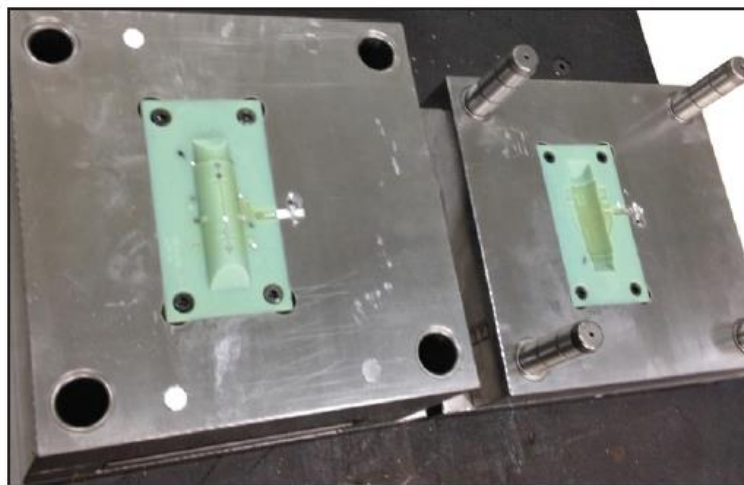
Metoda	Výhody	Nevýhody
Ocelová základna formy	<ul style="list-style-type: none"> - lepší zarovnání tvárníku a tvárnice formy - zabudovaný vyhazovací mechanismus - lepší stabilita formy, je instalována jako vložka do dutiny - výroba formy - vložky je méně nákladná - základnu formy je možné opětovně použít 	<ul style="list-style-type: none"> - náklady na tvorbu ocelové základny formy a modulárního vyhazovacího mechanismu
Ocelová deska s vyhazovacím mechanismem	<ul style="list-style-type: none"> - nižší náklady na celkovou výrobu - zabudovaný vyhazovací mechanismus 	<ul style="list-style-type: none"> - náklady modulární vyhazovací mechanismus - forma není ve směrech kolmých k uzavíracímu tlaku zajištěna proti pohybu
Ocelová deska bez vyhazovacího mechanismu	<ul style="list-style-type: none"> - nejnižší náklady - snadná příprava a obsluha 	<ul style="list-style-type: none"> - ruční vyndávání omezuje tvarovou variabilitu výstřiku - forma není ve směrech kolmých k uzavíracímu tlaku zajištěna proti pohybu

ZÁKLADNA FORMY

V případě užití ocelové základny formy je možné tištěnou vstřikovací formu označit jako vložku. Tvárník i tvárnice se osadí do kapsy základny, kterou je možné opětovně použít pro jinou vstřikovací formu - vložku. Základna může být vybavena modulárním vyhazovacím mechanismem. Ten je nutné zohlednit při návrhu tištěné formy.

Tištěná forma - vložka se obvykle tvoří ve všech směrech o 20 až 25 mm větší než je dutina formy. Šířka a výška formy se navrhuje o 1 mm větší, než je kapsa základny. Každá stěna po obvodě základny se tedy odsadí o 0,5 mm ve směru normály této plochy. Hloubka formy - vložky se navýší o 0,2 mm (viz výše). Stranové rozšíření formy je během umísťování do základny formy postupně opracováno na požadovaný rozměr tak, aby přesně odpovídal rozměru kapsy základny. Navýšení hloubky o 0,2 mm se ponechává, aby se minimalizovalo zatečení do dělicí roviny.

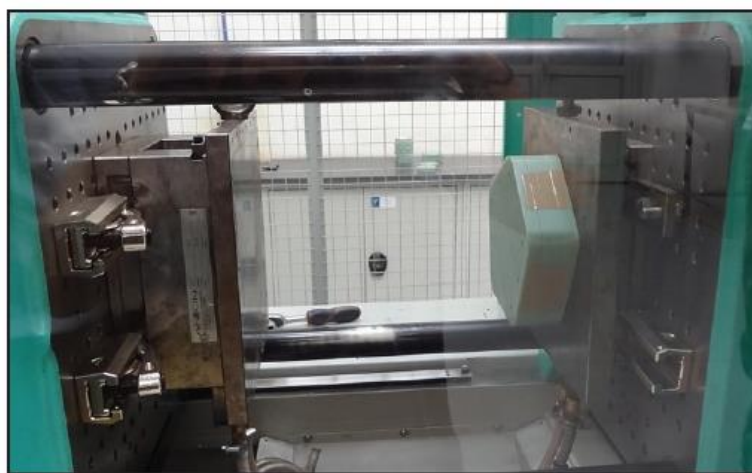
Forma je k základně uchycena šrouby, pro které je nutné připravit do formy otvory dle pozice otvorů základny [25].



Obr. 2-15: Základna formy, [25].

OCELOVÁ DESKA S VYHAZOVAČÍM MECHANISMEM

Tvárník a tvárnice jsou uchyceny na ocelové desky šrouby, pro které je nutné připravit, jak ve formě, tak v ocelových deskách, příslušné otvory. Tvárnice je na všech stranách o 20–25 mm větší než dutina formy. Tato hodnota může být se vzrůstajícím tlakem navýšena. Na straně tvárníku je umístěn vyhazovací mechanismus. Ocelová deska na straně tvárnice obsahuje vtok [25].



Obr. 2-16: Ocelová deska s vyhazovacím mechanismem, [25].

OCELOVÁ DESKA BEZ VYHAZOVAČÍHO MECHANISMU

Tvárník a tvárnice jsou uchyceny na ocelové desky. Na straně tvárnice deska může obsahovat vtok a průchodku. Tvárnice je na všech stranách o 20–25 mm větší

než její dutina. Se zvyšujícím tlakem se tento rozměr může navýšit. Pro udržení požadované pozice tvárníku a tvárnice vůči sobě se na jedné z nich vytvoří po obvodu otvory, do kterých se vsadí čepy nebo osadí šrouby. Průměr děr je o 0,1 mm menší než průměr čepů. Pro usnadnění ručního vyjmutí výstřiku, které může být jinak velmi náročné, je vhodné formu rozdělit na více částí a umožnit postupné odformování. Tím vzniknou další dělicí roviny, u kterých je nutné zvážit nejvhodnější polohu a minimalizovat zatékání. Efektivnějšímu vyjmutí výstřiku může pomoci i vhodné umístění úchytů [25].



Obr. 2-17: Ocelová deska bez vyhazovacího mechanismu, [25].

TISK FORMY

Soubor pro 3D tisk se obvykle dodává ve formátu STL. V aplikaci pro řízení tisku na příslušné 3D tiskárně se správně natočí jednotlivé části tak, aby se minimalizovala nutnost použití podpor. Dutina je tedy natočena směrem k trysce tiskárny a zajistí se tak lesklejší povrch dutiny. Druhé natočení se provádí tak, aby směr pohybu tiskové trysky byl shodný s pozdějším tokem taveniny do formy. Následně se vybere mód tisku pro kvalitu povrchu. Dle použitého modelu tiskárny se vybere maximální možná kvalita tisku.

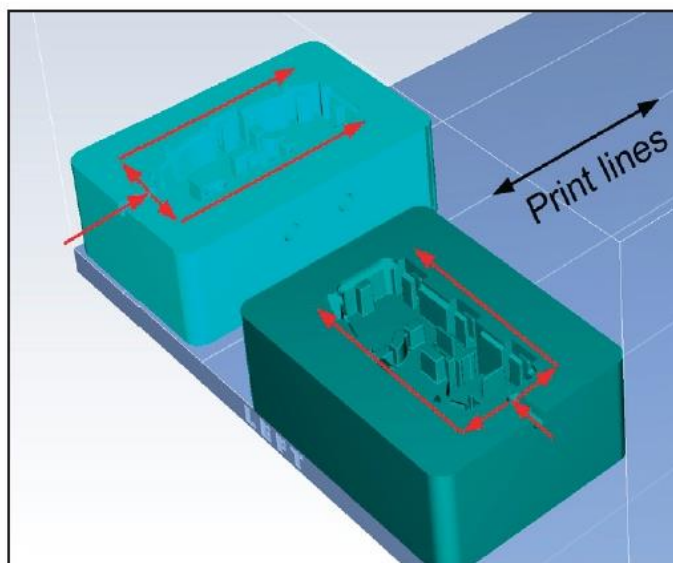


Figure 19: Orient so that resin flow (red) will be along print lines, as shown by the far core.

Obr. 2-18: Orientace formy při tisku, přepracováno z [25].

PŘÍPRAVA FORMY PRO VSTŘIKOVÁNÍ

Forma se odškrábne vhodným nástrojem od podložky tiskárny a zbaví se podpor. Následuje broušení dutiny formy za účelem snadnějšího vyjmutí výstřiku a pro zlepšení pohledových vlastností. Pro usnadnění vyjmutí či vyhození výstřiku se používá středně hrubý brusný papír, kterým se jemně dutina vybrousí. Pro zlepšení pohledových vlastností se následně použije na finální vyhlazení jemný brusný papír.

KOMPLETACE FORMY A UCHYCENÍ

Otvory pro instalaci čepů se na vhodném obráběcím stroji rozšíří pro těsné osazení čepů. Následně se ověří, zda jejich poloha a délka odpovídají poloze děr na druhé části formy a jejich hloubce. Obdobně se upraví díry pro vyhazovače. Díry musí přesně doléhat k povrchu vyhazovačů, ale musí umožnit i jejich volný pohyb. Pokud vtoková vložka není integrovaná do ocelové základny formy nebo desky, tak se dává přednost instalaci do formy. Otvor se rozšíří na požadovaný rozměr pro těsné osazení vložky. V případě osazení vložky do ocelové základny formy se ověří, zda obě části přesahují hloubku kapsy základny o 0,2 mm. V případě, že je přesah větší, tak se nutná vrstva zadní stěny formy odfrézuje. V opačném případě se vloží podložka. Uchycení formy k základně se provádí šrouby. Zde je nutné volit takový příslušný tlak, aby uchycení bylo dostatečné, ale zároveň nedošlo k prasknutí formy [25].

VSTŘIKOVÁNÍ

Tištěná forma z polymerového materiálu je méně odolná vůči abrazi, teplotě a tlakovému namáhání ve srovnání s hliníkovou a především ocelovou formou. Vstřikovací proces je tedy nutné upravit vlastnostem polymerové formy a postupně zkoušet upravovat vstřikovací parametry dokud není dosaženo požadovaných výsledků [25].

UZAMYKACÍ SÍLA

Kromě uzamykací síly se mluví též o uzavírací síle. To je síla odpovídající souhrnu všech sil působících na pohyblivou část formy před započítím vstřikování. Uzamykací síla, neboli síla maximální, je souhrn všech sil, které působí na vodící sloupky během fáze plnění. Tedy síly, které se snaží formu otevřít. Ty jsou určeny plochou, na kterou síly působí během procesu plnění. Plochu pro výpočet uzamykací síly získáme z průmětu formy do dělicí roviny včetně vtokového systému. Pro výpočet se následně použije rovnice:

$$F = p \times S \quad [21]. \quad (10)$$

p – tabulková hodnota předpokládaného tlaku v dutině formy [Pa],

S – plocha průmětu dutiny formy do dělicí roviny včetně vtokové soustavy [m²],

F – uzamykací síla [N].

2.1.11 VAKUOVÉ LITÍ

Vakuové lití do silikonových forem umožňuje rychlou výrobu plastových funkčních prototypových dílů nebo vytavitelných voskových modelů. Mezi hlavní výhody patří možnost výroby i tvarově složitých modelů za relativně nízkou cenu technologie ve srovnání s technologií vstřikování plastů. Tato metoda se řadí mezi tzv. technologie *RP* – rychlá výroba prototypů. Obvykle se používá při výrobě do cca 100 kusů dle složitosti modelu.

2.1.11.1 POSTUP VÝROBY

Pro přípravu silikonové formy je nutné mít k dispozici tzv. *master model*. Jedná se o prototyp, popř. již hotový výrobek, pro který máme vytvořit repliku. Pro výrobu master modelu prototypové výroby se v současné době obvykle využívá jedné z metod 3D tisku. Povrch master modelu musí být náležitě upraven, zalepeny díry pro šrouby, které je možné popř. na master modelu nedělat a na hotovém výrobku

dodatečně vyvrtat. Po definování dělicí roviny a přilepením vtokového kanálu je s pomocí tenkých drátků model upevněn do prostoru formovací nádoby.

Silikon musí být před započítím lití do formovací nádoby vakuováním zbaven rozpuštěných bublinek vzduchu. Vakuování se opakuje po zalití modelu. Vytvrzení silikonu při pokojové teplotě činí cca 12 hodin. Zvýšením teploty na 70 °C se doba tuhnutí zkrátí na cca 4 hod. Po vytvrzení se forma v místě dělicí roviny rozřízne.

Forma se pro zajištění lepšího zatékání licí hmoty před odléváním modelu temperuje na vyšší teplotu. Licí hmotu je rovněž pro zlepšení reologických vlastností možné předeheat. Pro zlepšení mechanických vlastností se odlitek vytvrzuje při teplotě 50 až 70°C.

2.1.11.2 MATERIÁL LICÍ FORMY

Pro výrobu formy se díky svým vlastnostem používají silikony. Především díky své pružnosti jsou vhodné pro odlévání složitých modelů obsahujících negativní úhly zkosení. Silikony jsou středně tvrdé, mají dobrou houževnatost a nízké smrštění. Díky své transparentní vlastnosti je snadné formu rozříznout ve vyznačené dělicí rovině na master modelu. Licí materiály pro silikonové formy jsou na bázi polyuretanů, epoxidů, polyesterů a silikonů, ale je možné použít např. i sádku, keramiku apod. Silikonová pryskyřice pro odlévání formy se smíchá s vytvrzovacím činidlem zajišťujícím zesíťování a vznik reaktoplastu.

2.1.11.3 LICÍ MATERIÁLY

Nejčastěji se používají polyuretanové (PU) pryskyřice. Výrobci pryskyřic nabízí několik různých typů a spolu s vytvrzovacím činidlem je možné získat konečný materiál s podobnými vlastnostmi jako u termoplastů. Variace modifikací jsou široké a je možné získat materiál kombinující požadované vlastnosti několika různých plastů – PE, PP, ABS, PS. Zlepšují se tak např. houževnatost, pevnost v tahu a ohybu apod.

Výsledným materiálem je reaktoplast vznikající smícháním dvou složek - PU pryskyřice a vytvrzovacího činidla. Zpracovatelnost hmoty po smíchání těchto dvou složek je obvykle 3 až 8 minut, ale může činit až 6 hodin. Při temperování na teplotu 70 °C dojde k vytvrzení během 30 až 120 minut. Teplotní odolnost dle typu pryskyřice dosahuje až 220 °C. Modul pružnosti činí 500 až 4500 MPa. Hustota se pohybuje od 1,06 až 1,22 g/cm³. Tvrdost zalévacích pryskyřic je cca 58–97 Shore D, 65–90 Shore A. Viskozita se pohybuje od 600 do 30 000 mPa.s. Naturální barva je bílá až béžová. Barvu je možné modifikovat přimícháním pigmentů [28].

2.2 NÁVRH TVARU A DESIGNU

Koncept motocyklu Midalu stále prochází vývojem a hledají se designové modifikace, které by zlepšily konkurenceschopnost na mezinárodním trhu.

Výrazným prvkem motocyklu Midalu je jeho motor o objemu 2442 cm³ a bez pochyby kapotáž s karbonovým povrchem a specifickou kombinací ostrých lineárních křivek a ploch spolu s aerodynamicky tvarovanými segmenty typickými pro sportovní motocykly. Objemově i tvarově nejvýraznějším prvkem kapotáže je část kryjící palivovou nádrž. Spolu s odhaleným motorem nacházejícím se pod touto částí, tvoří dominantní střed celého motocyklu. Zadní část svůj objem úměrně snižuje, ale díky výrazné kapotáži výfuků a objemné zadní vidlici je celkový obraz ve vazbě na dominantní střed vyvážený.

Přední části motocyklu, především při čelním pohledu, vévodí konstrukce chladiče. Dohromady s přední vidlicí, tlumiči a kolem objemově odpovídají zadní části motocyklu. Prvkem, který stojí za zamyšlení a návrhem i několika designových řešení, je přední světlo a kryt tachometru. Právě několik variací řešení by se mohlo stát i jedním z marketingových bodů.

Tato práce se následně zabývá výrobou prototypového modelu a formy krytu tachometru, ale z důvodu silné vazby mezi tachometrem a světlem se návrh designu dotýká i světla. V původní designové koncepci má tvarosloví světla a tachometru blíže k chladiči než ke kapotáži palivové nádrže (Obr. 2-19). Rovněž světlo a tachometr tvoří samostatné díly bez výrazné vazby. Nový koncept světla a tachometru vytváří jistý most mezi aerodynamickým tvarem kapotáže palivové nádrže a lomenými plochami chladiče (Obr. 2-23 a 2-26). Světlo spolu s tachometrem tvoří jeden kompaktní celek s výraznějším aerodynamickým tvarem akcentujícím tvar chladiče několika ostřejšími liniemi (Obr. 2-25). Po sesazení obou částí do jednoho objemnějšího celku se tato část jeví vyváženěji vůči zbývajícimu objemu motocyklu. Přesto si však tento koncept zachovává myšlenku oddělené kapotáže předního světla a tachometru od střední kapotáže motocyklu. Umožňuje tak nezávisle měnit povrchovou úpravu jednotlivých částí. Možnost zvolit si různé povrchové úpravy světla a tachometru je již nyní součástí marketingové strategie.

Níže jsou zobrazeny skeče, ze kterých se dále čerpalo při tvorbě 3D modelu a následné vizualizaci (Obr. 2-20 a 2-21). Je z nich patrná snaha navázat linie kapotáže palivové nádrže na tvar světla a tachometru a více začlenit tuto část motorky do celkového konceptu. Původně jeden masivnější reflektor blízký kruhovému tvaru je nyní rozdělen na dva menší. Uvažuje se i o verzi jednoho světlometu navazujícího svým krytem na polykarbonátový kryt tachometru.

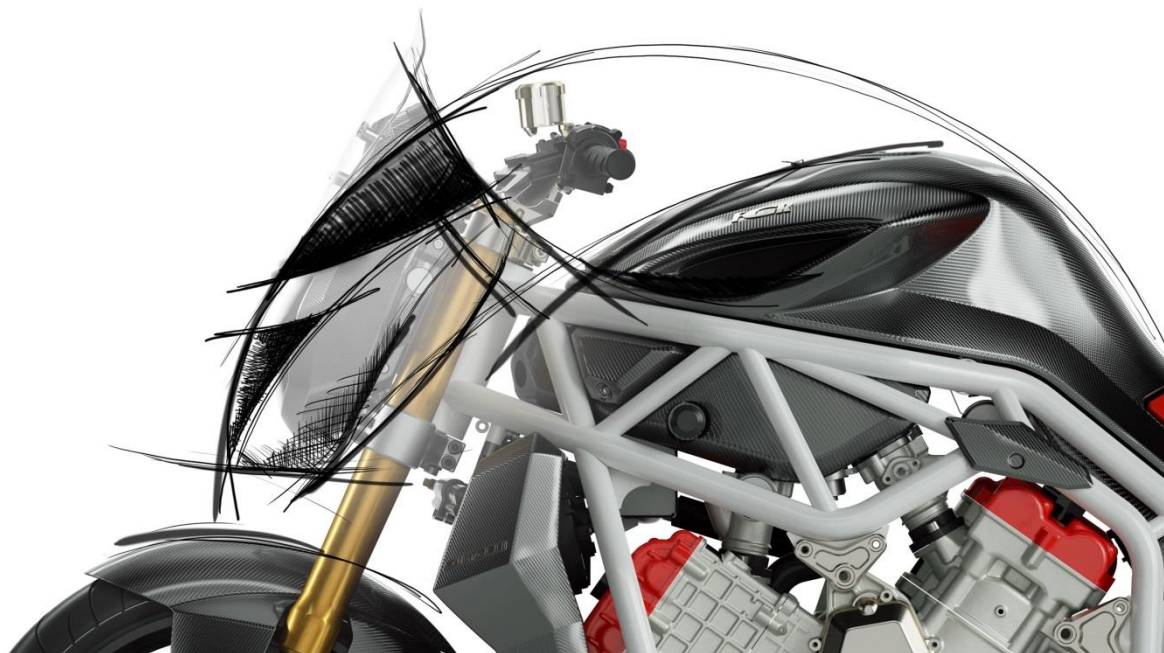
Vizualizace nového designu ve větším rozlišení a na kvalitním papíře jsou součástí přílohy č.1. a v elektronické podobě jsou přiloženy na CD spolu s animací.



Obr. 2-19: Původní design předního světlometu a tachometru.



Obr. 2-20: Ideový návrh designu předního světla a tachometru.

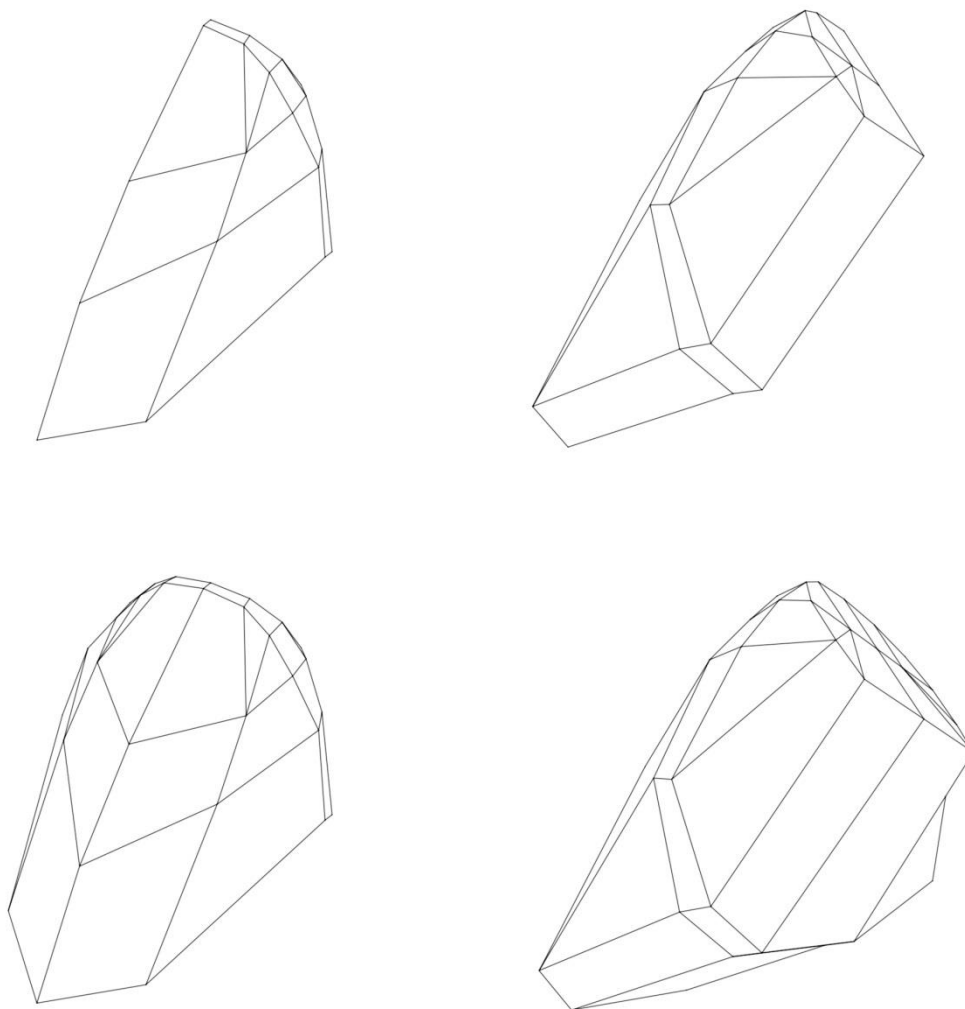


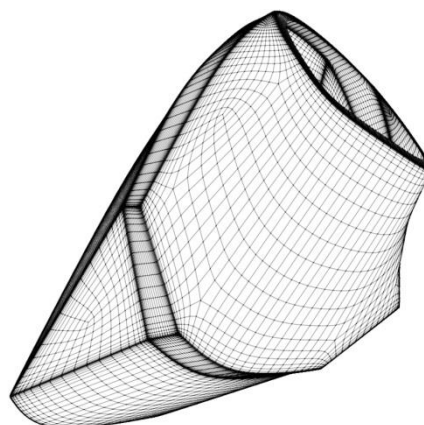
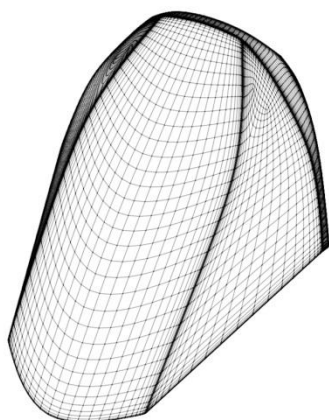
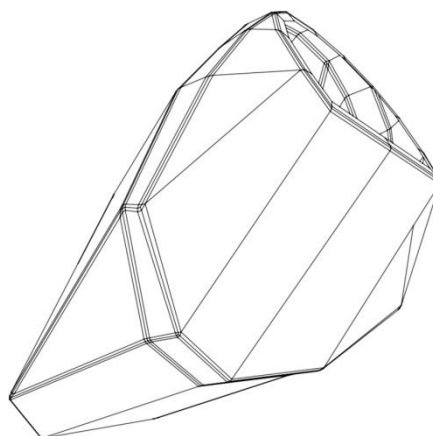
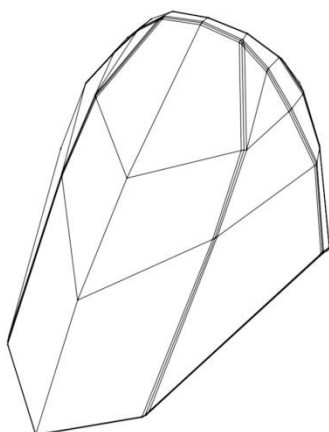
Obr. 2-21: Ideový návrh designu předního světla a tachometru.

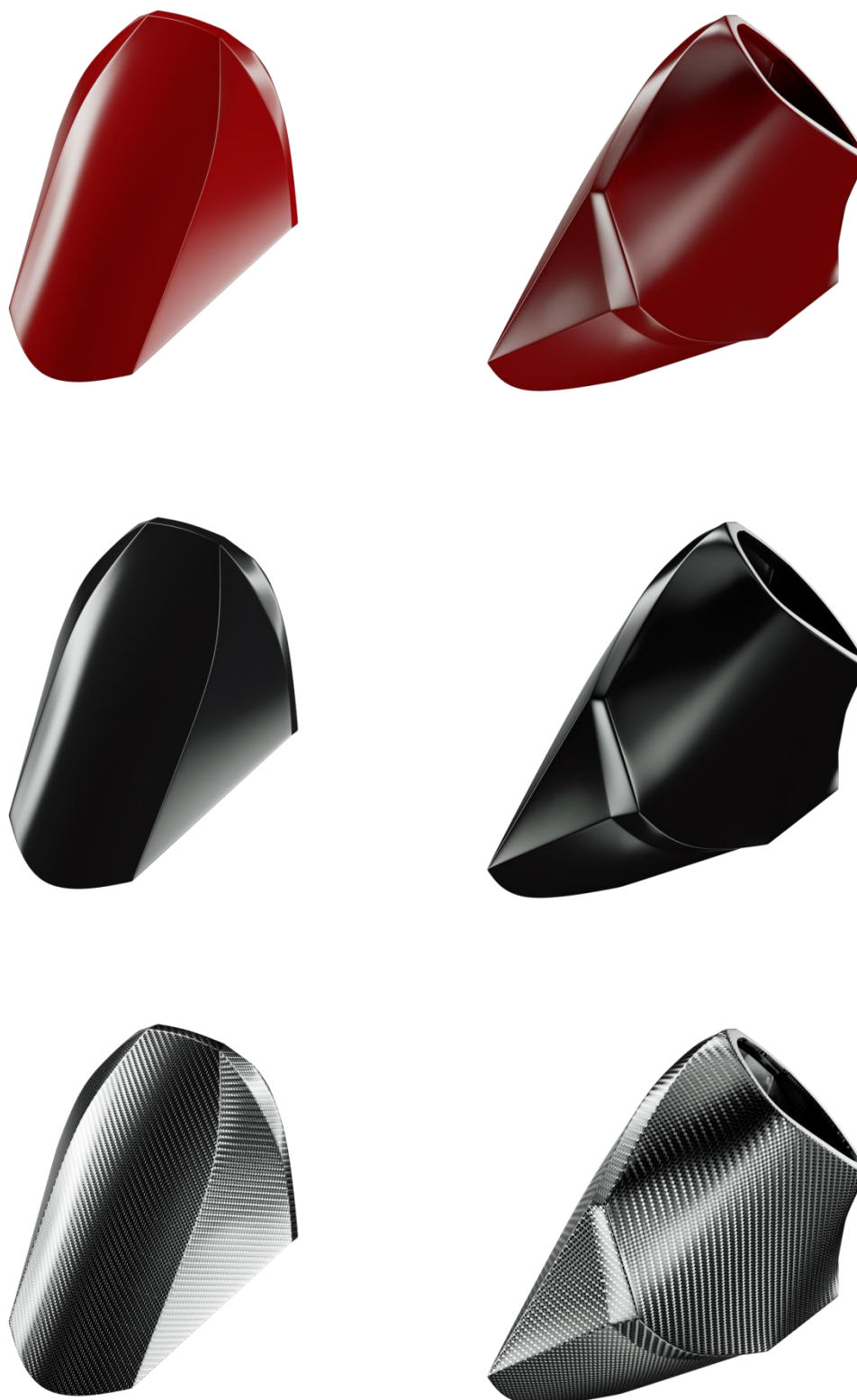
2.3 TVORBA IDEOVÉHO 3D MODELU

Pro finální návrh designu v podobě 3D modelu bylo využito stejného softwaru jako pro práci s 3D modelem motocyklu při tvorbě propagační animace. Jedná se o software Cinema C4D, který je hojně používán při tvorbě vizualizací a animací v různých odvětvích průmyslu. Tento software nepracuje s NURBS křivkami a plochami, ale využívá nižší stupeň geometrie. Jako křivky je možné využít tradiční lineární, kubickou, B-spline, beziérovu a akima křivku. S pomocí generátorů je možné z těchto křivek vytvářet i složité tvary těles. Generátory jsou v tomto případě obdobné nástroje jako v případě jiných konstrukčních programů (Rhinoceros, SolidWorks a další). Plochy jsou však tvořeny polygony, a vyhlazení povrchu je tedy závislé na hustotě respektive velikosti polygonů. Polygon je elementární plocha v prostoru určena 3 body nazývané vertexy. Tvorba modelu s využitím křivek je jednou z forem modelování. Častěji se však při návrhu designu využívá metody postupného definování tvaru výrobku ze základních geometrických těles. Vhodným uspořádáním polygonů je možné dosáhnout různě zakřivených ploch podobných NURBS plochám. Výše uvedený software rovněž využívá různé modifikátory podobné např. jinému programu pracujícím s NURBS plochami jako je Rhinoceros a další konstrukční programy pro snadnější modelování volných ploch. Výsledný model je tedy polygonální složený z elementárních trojúhelníkových ploch stejně jako je tomu v případě formátu STL používaného pro import modelu do 3D tiskáren.

Proces tvorby 3D modelu vycházel z ideových skečů a myšlenek uvedených výše. Návrh designu se z počátku vytvářel v tzv. „low poly“ modelu v kombinaci s HYPERNURBS modifikátorem (Obr. 2-22). Low poly model znamená, že imaginární výsledný model složený z velkého množství polygonů, je na počátku navrhování konečného tvaru včetně detailů navrhován z relativně malého množství polygonů, aby bylo možné provádět efektivně tvarové modifikace. Hypernurbs modifikátor podle svého stupně interpoluje sousedící polygony na vyšší počet polygonů, přičemž úhel svíraný normálami původních polygonů je rozložen mezi nově vytvořené polygony. Vztah ploch „low poly“ modelu a výsledného modifikovaného modelu je obdobný jako mezi řídicí křivkou a její NURBS křivkou. Takto je možné „low poly“ model transformovat do „high poly“ modelu s hladkým povrchem.







Obr. 2-22: Vývoj ideového polygonového modelu.



Obr. 2-23: Nový design předního světlometu a tachometru.



Obr. 2-24: Nový design předního světlometu a tachometru.



Obr. 2-25: Nový design předního světlometu a tachometru.



Obr. 2-26: Nový design předního světlometu a tachometru.

2.4 VOLBA TECHNOLOGIE VÝROBY

Předcházející kapitoly pojednávají o několika technologiích výroby, charakteristice materiálů a procesu výroby. Komplexní znalost nabízených variací výroby je nutná ke správnému výběru technologie po stránce ekonomické i technologické. Po konzultaci s vedoucím výroby motorky Midalu panem Felgrem se mělo jednat spíše o malosériovou výrobu s objemem do 100 kusů za rok. Horní limit je nastaven s výraznou rezervou a prozatím se čeká na reakci trhu.

Malý objem výroby vylučuje pro výrobu plastových dílů návrh a konstruování ocelových vstřikovacích forem. Především tvar výrobku by výrazně komplikoval výrobu formy. V případě, že by bylo možné zajistit zaformování dutiny s negativními úhly, jednalo by se o komplikovanou konstrukci formy a s tím spojené vysoké náklady. Vysoká cena formy, i přes nízké náklady na výrobu jednoho výstřiku, nejsou při malosériové výrobě ekonomicky vhodným řešením.

V případě výroby plastové vstřikovací formy technologií 3D tisku je tvar výrobku opět výraznou komplikací. Negativní úhly dutiny neumožňují snadné odformování. Nabízí se možnost rozdělení výrobku na dvě části ve vhodné rovině a po vyhotovení obou výstřiků obě části opět spojit. Výroba dvojnásobné formy však zvyšuje náklady na výrobu a rovněž nepřesnosti během výroby. V případě plastových forem je nutné zohlednit omezený rozsah povoleného vstřikovacího tlaku, dobu tuhnutí atd. Tyto faktory spolu s nutností dělení výrobku na dvě části s následnou montáží, zavedením forem do výroby a v neposlední řadě nutností použití vstřikovacích strojů snižují efektivitu této metody a na malosériovou výrobu nemusí být vhodným kandidátem.

Protože se předpokládá malosériová výroba, tak si 3D tisk jako primární technologie výroby zaslouží značnou pozornost. Značný pokrok v této technologii v přesnosti tisku, mechanických vlastností použitých materiálů spolu s malosériovou výrobou, dělá z této technologie lákavou volbu výroby uvažovaného produktu. Odbourání výroby složité ocelové vstřikovací formy, popř. dvojnásobné plastové formy a montáže, dělá z ekonomického hlediska tuto technologií přijatelnou variantu výroby a to i přes výrazně vyšší náklady na kus. Je však nutné uvažovat limity v kvalitě povrchu nebo termomechanických vlastností v případě použití technologie MJM zajišťující přesnější tisk a lepší vizuální kvalitu povrchu.

Mezi metody RP se řadí také vakuové lití popsané v kapitole 2.5. Spolu s technologií 3D tisku je vhodnou volbou pro malosériovou výrobu platových dílců. Vzhledem k možnosti zaformování i dílce s dutinou včetně malých negativních úhlů a využití technologie 3D tisku při tvorbě *master modelu* je zvolena pro výrobu nulté série tato metoda.

3 VÝROBA PROTOTYPOVÉHO DÍLU A FORMY

Jako technologie výroby byla na základě výše popsaných metod a podmínek, z nichž nejvýraznější je technologická proveditelnost a ekonomická náročnost, zvolena metoda vakuového lití. Pro tuto technologii bude vyrobena silikonová forma, která umožňuje se lépe vypořádat se složitým tvarem výrobku a negativními úhly, jež znemožňují výrobu vstřikováním tohoto dílu jako jeden kus a výroba dvou hliníkových forem se jeví neekonomická. Pro výrobu silikonové prototypové formy je nutné nejprve vyrobit prototypový díl tzv. *master model*. Pro jeho výrobu využijeme technologii 3D tisku. Po zhotovení formy bude následovat odlití prototypového kusu metodou vakuového lití.

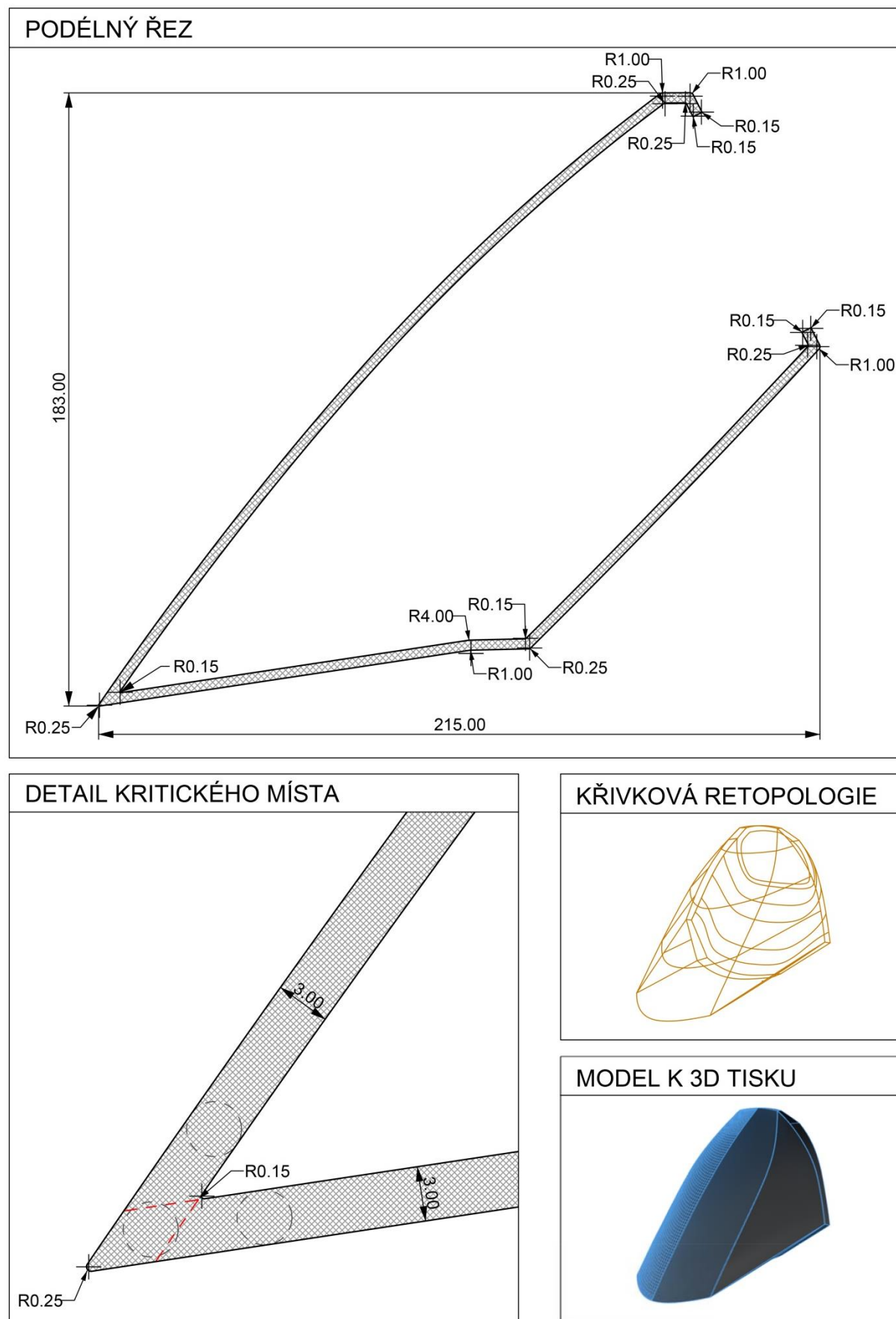
3.1 3D MODELACE MASTER MODELU

Technologie 3D tisku vyžaduje přípravu 3D modelu a převod do formátu STL tzv. stereolitografie, jež je název i pro metodu 3D tisku, pro kterou byl tento formát vyvinut firmou 3D Systems. Zkratka STL se také překládá jako *Standard Triangle Language*. Jak tento název napovídá, nejedná se o definici ploch a těles matematickým modelem NURBS užívaným konstrukčními programy, ale o definici ploch rozdělením na elementární rovinné plošky. Ty jsou tvořeny trojúhelníky, které určují rovinu s jediným možným řešením.

Při návrhu designu bylo použito softwaru pracujícího na obdobném principu. Plochy a posléze tělesa definuje rozdělením jejich ploch na menší elementární trojúhelníkové plochy, které nazýváme polygony. Tento model vytvořený v programu Cinema C4D by bylo tedy možné exportovat do formátu STL a následně tisknout ve stejném stavu, v jakém bychom jej viděli v uvedeném programu. Nevýhodou tohoto programu je však nutnost započítání modelace od větších polygonů definujícím přibližný tvar tělesa (viz obr. 2-22), následně se zpřesňováním detailů na modelu se polygony zmenšují a v poslední fázi se obvykle pro vyhlazení využívá metoda HyperNURBS, která proloží dva sousedící polygony dle nastaveného stupně vyšším počtem polygonů, u kterých v případě uzavřené plochy je součet úhlů mezi normálami stejný jako mezi původními polygony. Touto metodou je tedy komplikované přesně řídit konečný tvar. Zejména u zaoblených hran, a to především hran tvořených plochami svírající ostrý úhel, dochází ke změně nastaveného poloměru zaoblení. Další komplikace se objevily v případě zajištění konstantní tloušťky profilu. Běžně používaný příkaz „skořepina – shell“ způsoboval u některých polygonů chybné chování a po vyhlazení modelu je nemožné zaručit, především v rozích svírající ostrý úhel, správnou tloušťku profilu.

Z toho důvodu byl model použit krom vizualizací jako předloha pro model tvořený NURBS plochami. Tento model byl vytvořen v programu Rhinoceros často používaným designery. Tvar tachometru byl prvně kopírován křivkami určujícími jeho dílčí roviny. Během modelování došlo k drobným úpravám finálního tvaru. Následně z těchto křivek byl s pomocí několika funkcí programu vymodelován vnější povrch tachometru bez zaoblení hran. Aby byla zajištěna symetrie modelu, byla modelována polovina tachometru a následně zrcadlena. Zaoblení hran je nutné provést až jako finální úpravu po vytažení tloušťky profilu příkazem „skořepina - shell“. V opačném případě není možné tento příkaz při negativním vytažení ploch u malých poloměrů zaoblení použít. V těchto místech dochází ke vzniku nedefinovatelných ploch a příkaz je zamítnut.

Hrany a rohy jsou citlivé na vznik deformací, ke kterým dochází v důsledku rozdílného teplotního gradientu v daném místě. Ten způsobuje nahromadění většího množství materiálu a tedy následné pomalejší ochlazování v případě vstřikování plastů a tím větší krystalizaci s následnými deformacemi. Z toho důvodu je nutné zajistit v maximální míře konstantní tloušťku, respektive množství materiálu v každém elementární části modelu, a vyhnout se ostrým přechodům. V případě vstřikovacích forem z kovových slitin se v kritických místech využívá popř. intenzivnějšího chlazení. Při spodní čelní části modelu, která navazuje na povrch předního světla, se nachází styk dvou ploch svírající výrazný ostrý úhel (Obr. 3-1). Při vstřikování plastů by tento detail bylo složité ošetřit lokální úpravou profilu a zvýšení lokálního chlazení by bylo pravděpodobně nezbytné. S využitím vakuového lití se předpokládá výrazné snížení vzniku deformací z důvodu lokální změny tloušťky profilu. Lití pryskyřice a smíchání s vytvrzovacím činidlem probíhá za poměrně nízké teploty a nízkého tlaku za vzniku pevných chemických vazeb a husté polymerní sítě, čímž se snižuje smrštění při přechodu z tekutého stavu do pevného. Toto tvrzení bude ověřeno porovnáním 3D skenu hotového výrobku s originálním modelem. Níže je uveden podélný řez v ose modelu, detail kritického místa se zvýrazněním nárůstu hmoty pomocí kružnic a poloměry zaoblení hran snižující vnitřní pnutí v okolí styku dvou ploch.



Obr. 3-1: Schématický zákres 3D modelu k tisku.

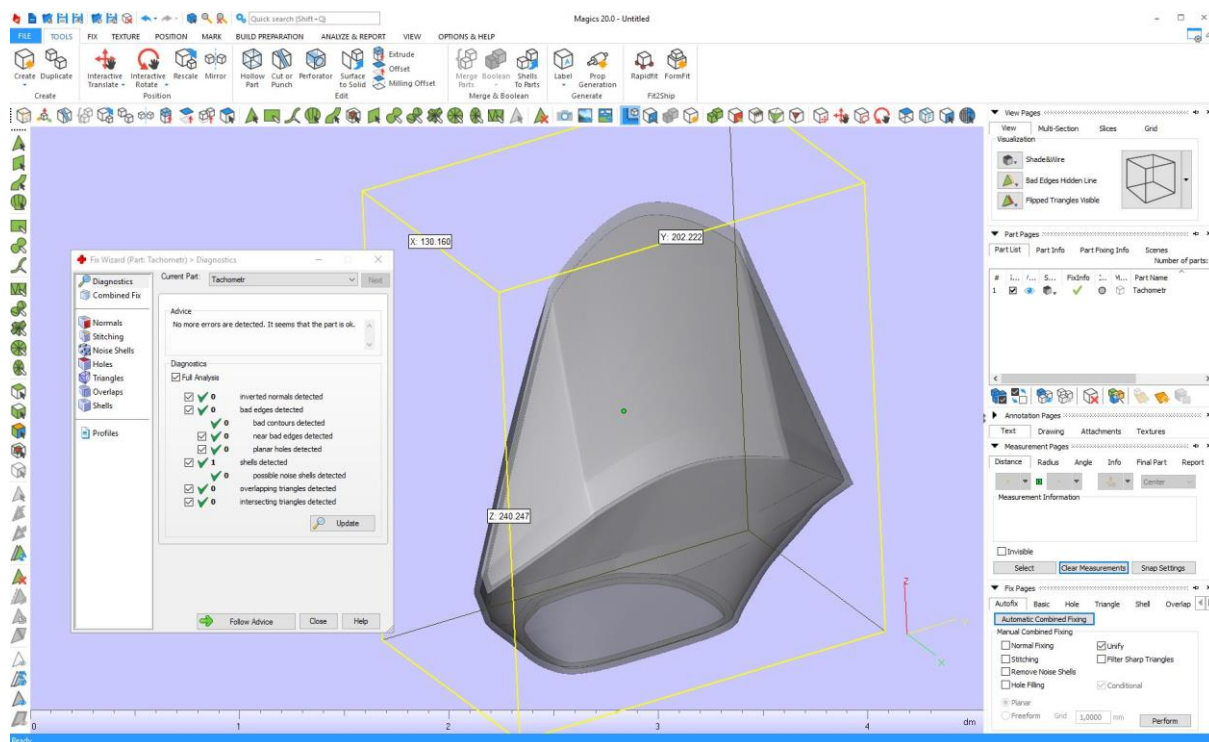
3.2 TISK MASTER MODELU A JEHO ÚPRAVA

Většina 3D tiskáren je nastavena pro 3D modely ve formátu STL. Tento formát je možné exportovat z běžně používaných konstrukčních softwarů.

Pro export z NURBS modelu do STL je nutné nastavit hodnoty pro převod, které určují výslednou podobu, respektive kvalitu tisknutého modelu. Povrch modelu je převeden do trojúhelníkové polygonové sítě, která musí být dostatečně hustá, aby byla zaručena dostatečná hladkost povrchu, ale rovněž je nutné přihlížet k velikosti STL souboru, který nemusí být v případě velkého množství dat tisknutelný. Při exportu byl typ souboru zvolen binární, maximální úhel mezi polygony 5° , maximální poměr stran 6, minimální délka hrany 0,001 mm, maximální délka hrany 4 mm a maximální vzdálenost hrany k povrchu 0,01 mm.

Následně se model importoval k inspekci do programu **Magics** verze 20 (Obr. 3-2). Ten slouží ke kontrole geometrie. Při exportu do formátu STL může dojít ke vzniku chyb vzniklých při polygonyzaci NURBS ploch. Nejčastěji dochází k obrácení normál polygonů, chybného vytvoření hran, kde se mohou např. překrývat dvě hrany sousedících polygonů, vzniku děr v modelu atd. Tyto drobné vady nemusí být patrné pouhou oční inspekci na monitoru vzhledem k velikosti a množství polygonů.

Inspekce nenašla na modelu žádné chyby a bylo možné tedy postoupit dál k přípravě tisku.

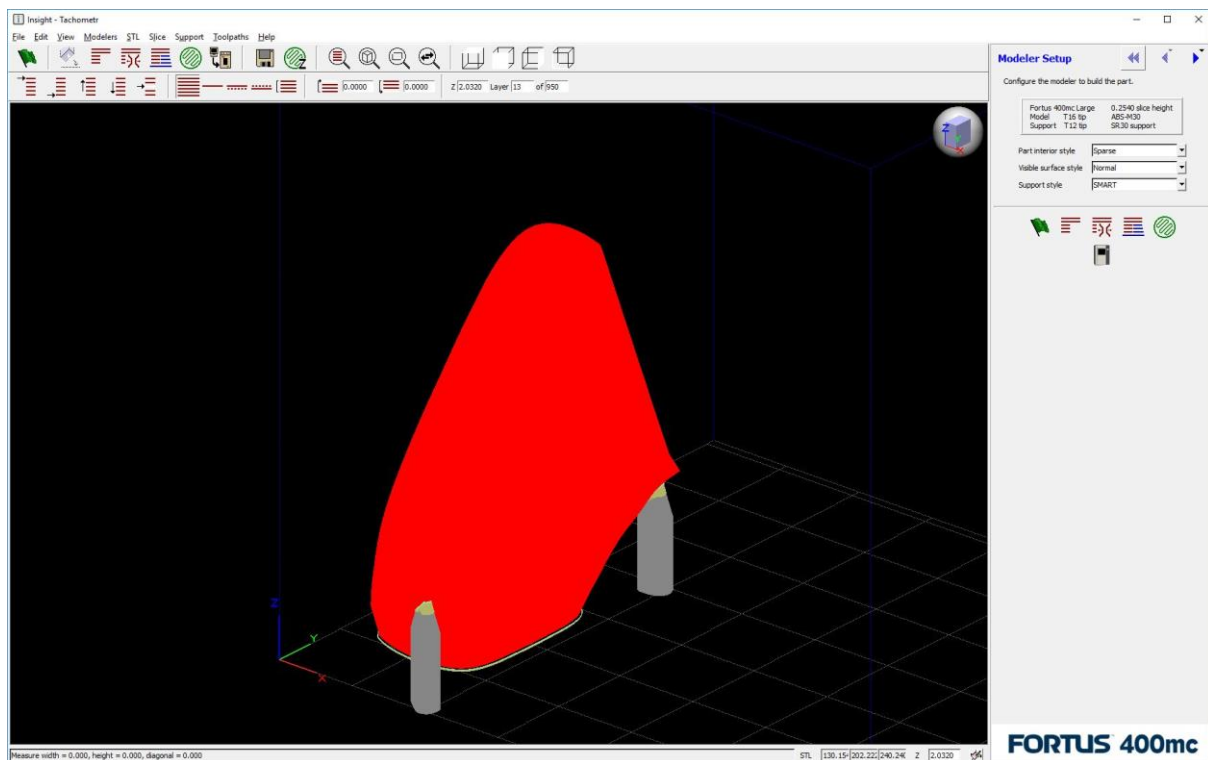


Obr. 3-2: Inspekce modelu v programu Magics 20.

Samotná příprava modelu k tisku probíhala v programu **Insight** (Obr. 3-3). Ten zprostředkovává komunikaci mezi PC a tiskárnou, ke které má nainstalované ovladače.

Po importování modelu do programu Insight se v prvním kroku nastavil typ tiskárny, kde byla zvolena tiskárna Fortus 450mc společnosti Stratasys. Dále se volil materiál modelu ABS-M30, materiál podpor SR 30 support a výška tisknuté vrstvy 0,1778 mm. Šířka tisknuté linie je vždy dvojnásobkem výšky vrstvy. Tryska pro tisk modelu a podpor byla zvolena manuálně v tiskárně dle tabulek výrobce tiskárny.

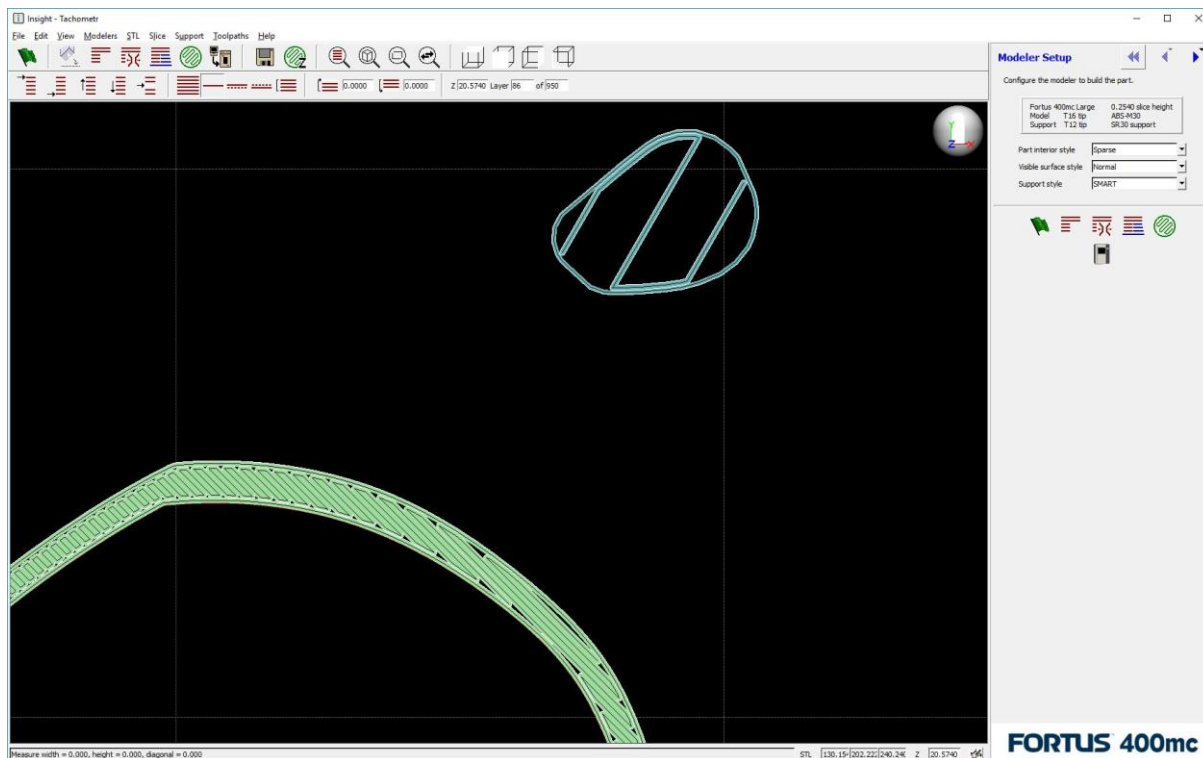
Oba výše uvedené programy jsou dostatečně pokročilé a jsou schopny řadu úkonů vyhodnotit automaticky. Mezi ty hlavní patří potřeba tisku podpor. Podpora je dodatečná tisknutá konstrukce modelu, která zajišťuje podporu modelu v prostoru, stabilitu modelu proti převrácení či rozkmitání a zajišťuje technologickou proveditelnost tisku v případě výrazně převýšených částí modelu.



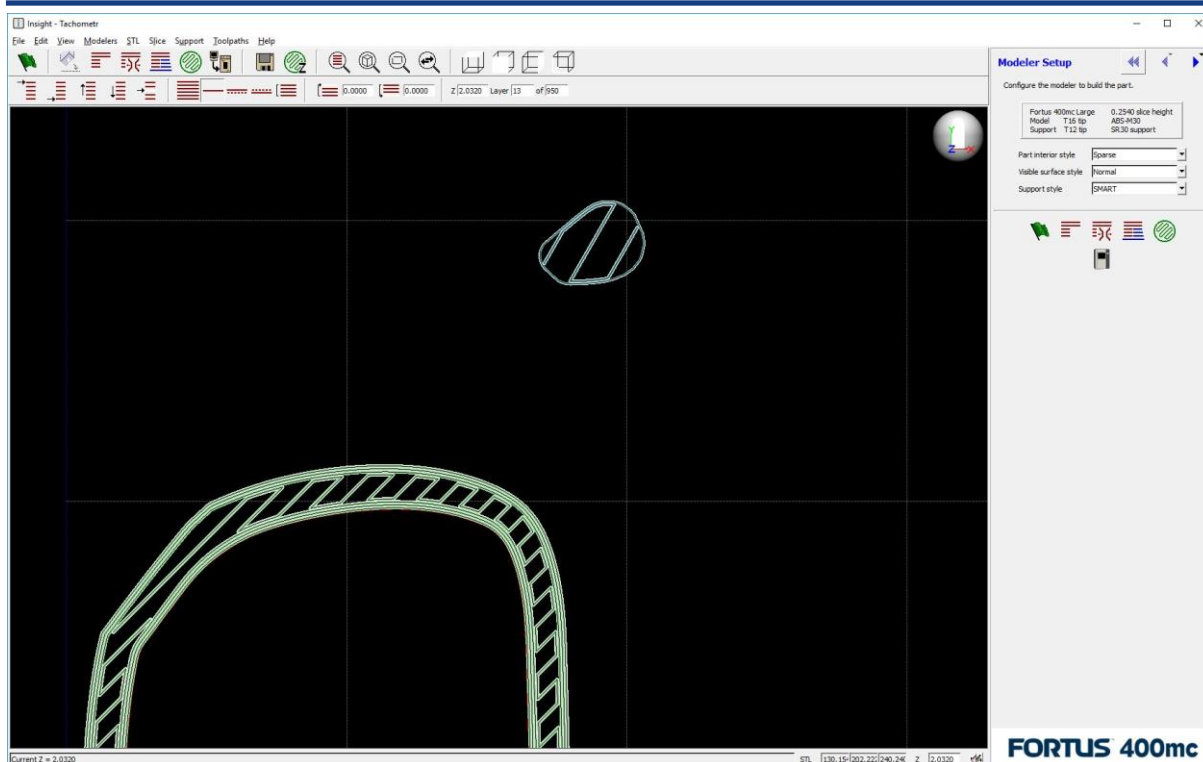
Obr. 3-3: Stavba podpor v programu Insight.

Typ podpor je možné zvolit manuálně, nebo ponechat typ v módu **SMART**, který vyhodnotí potřebu podpor dle topologie modelu, jeho rozměrů, styku modelu s platformou apod. Pro náš model byla ponechána tato volba. Např. v případě tisku vysokých tenkých objektů je vhodné manuálně zvolit mód **SURROUND SUPPORT** zajišťující stabilitu modelu. Model tachometru se bude tisknout metodou FDM. Protože se na modelu vzhledem k jeho natočení nevyskytují plochy s příliš nízkým úhlem vztaženým k platformě tiskárny, není nutné provádět podporu v celém objemu modelu, jako je to např. nutné v případě tisku na bázi práškových materiálů. Systém vyhodnotil potřebu podpor v krajních polohách modelu pro zajištění stability.

Dále se volila struktura modelu, jeho povrchu a struktura podpor. Strukturou modelu se myslí styl vyplnění prostoru mezi povrchy modelu. Typ výplně je možné zvolit **SOLID** nebo **SPARSE** (Obr. 3-4 a 3-5). Volba *solid* vyplní celý prostor mezi vnitřním a vnějším povrchem modelu. *Sparse* provádí analýzu prostoru mezi povrchy a ve vhodných částech vytváří mezi povrchy strukturu podobnou včelímu úlu za účelem snížení spotřeby materiálu a strojního času. Pro master model byla z ekonomických důvodů zvolena metoda *sparse*, protože se model nebude výrazně zatěžovat a není vyžadována vysoká tuhost. Stejná struktura byla zvolena pro podpory. Pro viditelné povrchy je zvolena vysoká kvalita tisku zajišťující hladší povrch.

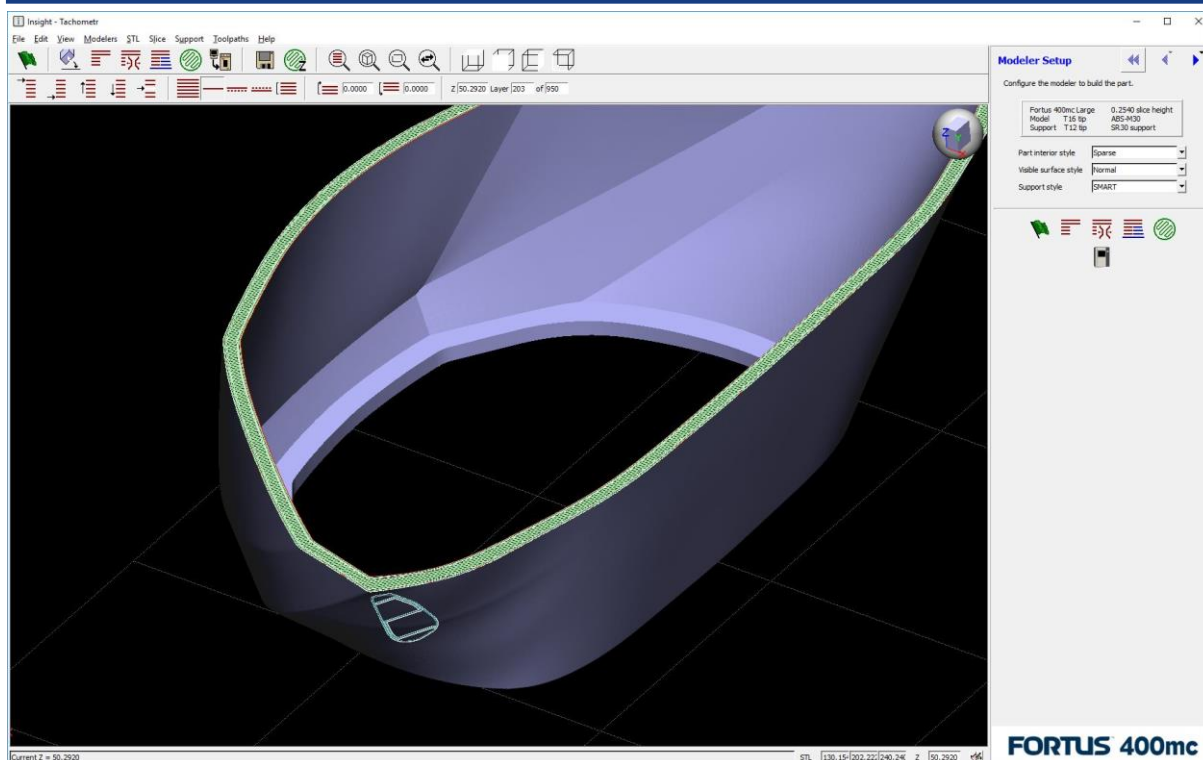


Obr. 3-4: Vnitřní struktura modelu a podpor.



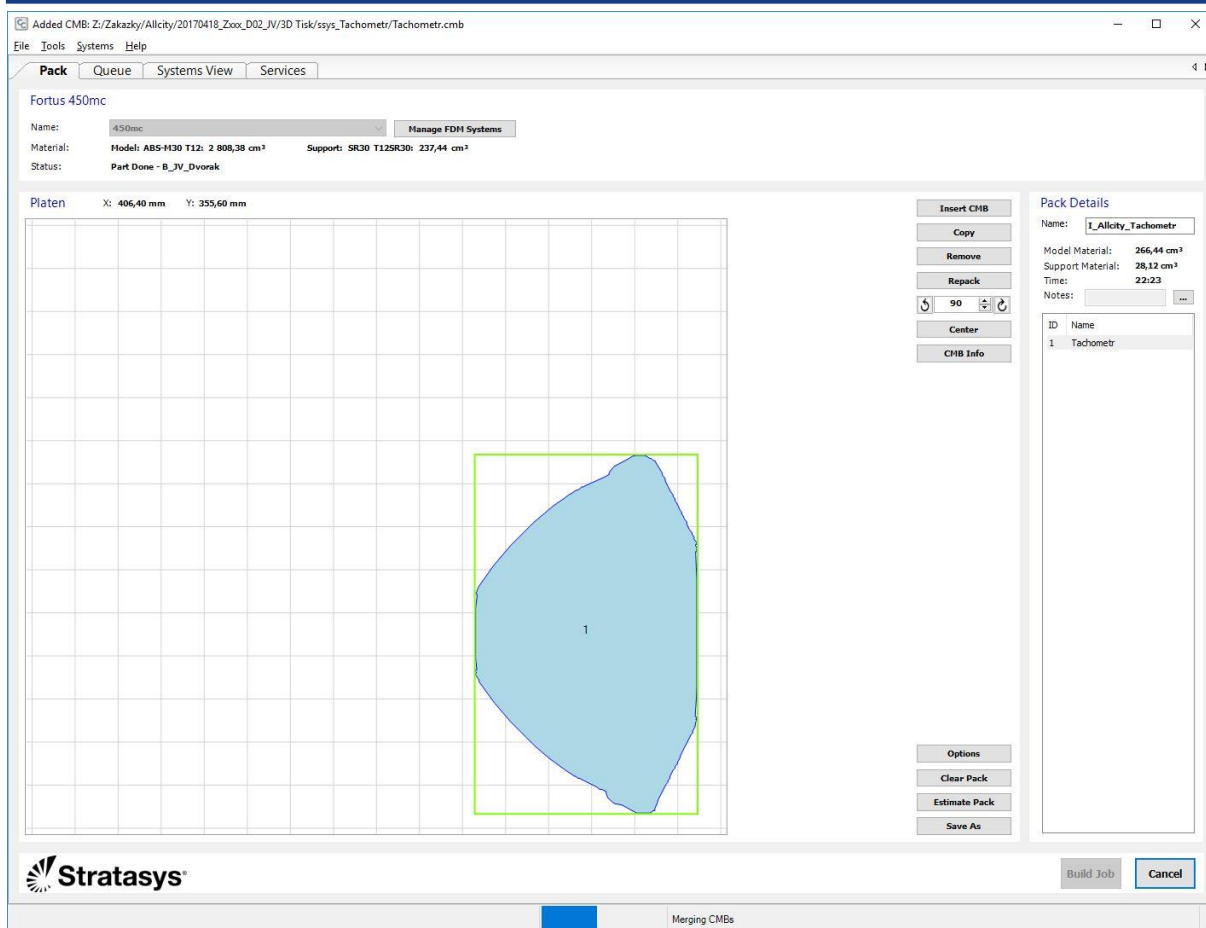
Obr. 3-5: Vnitřní struktura modelu a podpor.

Dalším krokem je tvorba vrstev tisku. Model je rozřezán po jednotlivých vrstvách dle zvolené výšky. Cesta trysky musí vytvářet uzavřené křivky. V případě výskytu neuzavřených křivek program na vzniklou chybu upozorní a je nutné sjednat nápravu. Tu je možné provést nástroji přímo v *Insight* nebo např. ve výše uvedeném programu *Magics*. Pokud není možné provést opravu nástroji některým z uvedených programů nebo jiným, je nutné se vrátit k původnímu modelu do fáze před převodem do STL formátu a sjednat nápravu již v tomto bodě. Prvních cca 5 až 10 tištěných vrstev modelu tvoří podpora, která bude po dokončení tisku odstraněna.



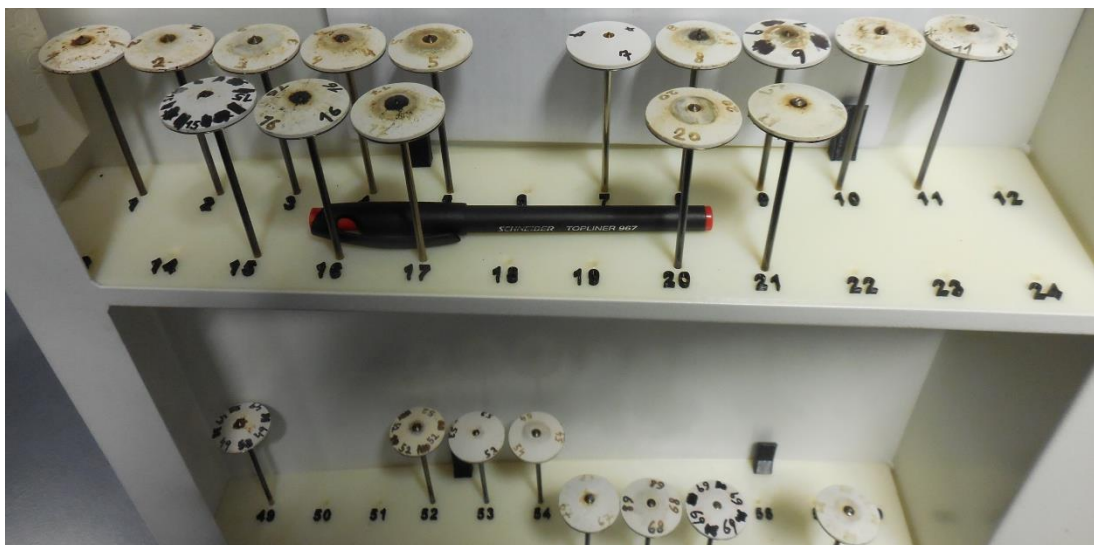
Obr. 3-6: Rozřezání modelu na jednotlivé vrstvy tisku.

Po rozřezání modelu je možné odeslat model do tiskárny. V tiskovém prostoru tiskárny se softwarově vybere vhodné umístění (Obr. 3-7). Preferuje se umístit model blízko k výchozímu bodu tiskové hlavy z důvodu redukce času tisku a vzniku možných drobných vad vzniklých malým průtokem zahřívaného plastu v trysce.



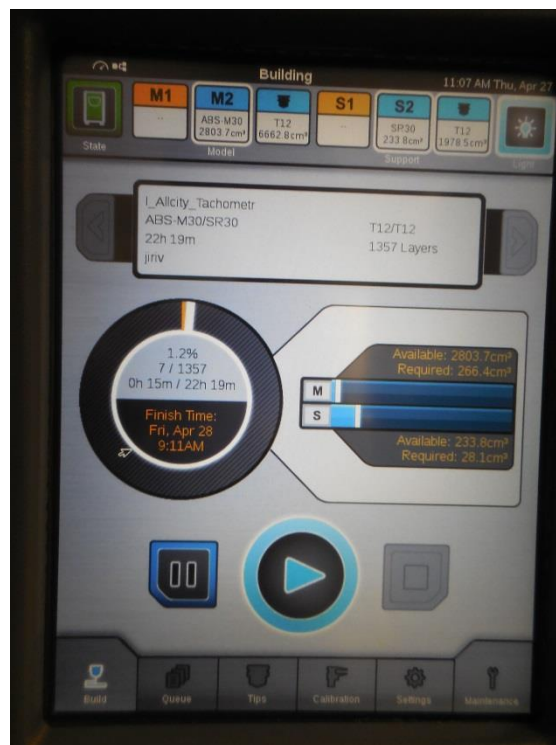
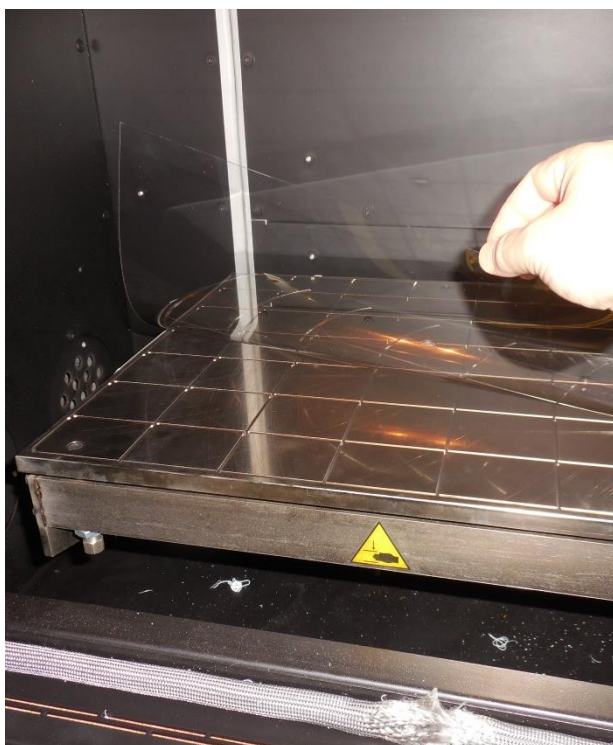
Obr. 3-7: Umístění modelu do tiskového prostoru.

Po odeslání modelu do tiskárny se použijí předepsané trysky pro tisk modelu a podpor. Pro obě části jsou výrobcem předepsané různé trysky dle materiálu a výšky vrstev (Obr. 3-8). Každá tryska má dle použitého materiálu definovanou životnost. Pro tisk modelu byla použita tryska T12 a pro tisk podpor přidružená tryska T12SR30.

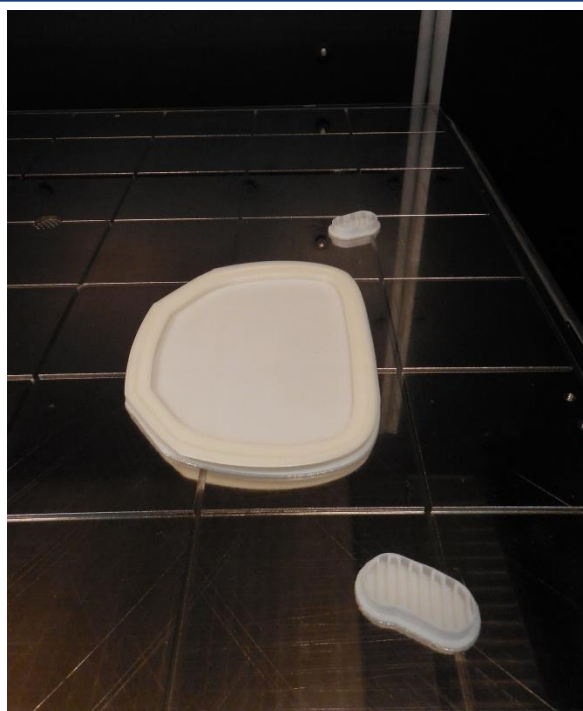


Obr. 3-8: Typy tiskových trysek.

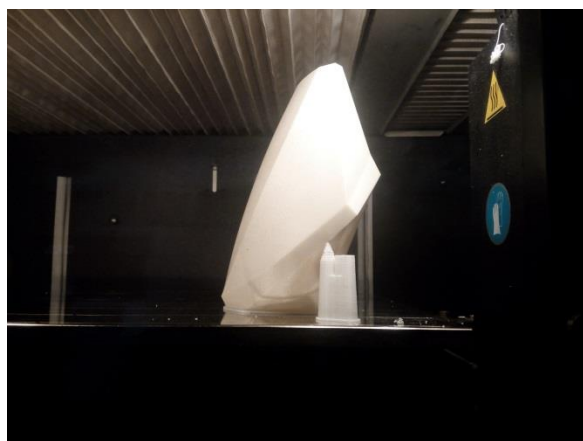
Na tiskovou platformu tiskárny se vkládá fólie (Obr. 3-9) pro snadné vyjmutí modelu z tiskárny. Vytvořeným podtlakem mezi fólií a platformou tiskárny je zamezeno jejímu posunu. Na panelu tiskárny byla ještě provedena kontrola, zda je dostatek materiálu v zásobníku vzhledem k předpokládané spotřebě materiálu uvedené na panelu 2808.4 cm³ pro tisk modelu a 28,1 cm³ pro tisk podpor (Obr. 3-9). Dostupné množství obou materiálů je rovněž uvedeno na displeji. Umístění modelu v tiskové formě může zůstat softwarově předdefinované z přechozích kroků nebo je možné je změnit na panelu tiskárny. V našem případě bylo ponecháno. Na panelu je možné vyčíst další hodnoty jako je např. aktuální teplota trysek, která se dle aktuálně tištěné konstrukce mění, nebo např. předpokládaná doba tisku, která v našem případě činí 22 hod. 19 min.



Obr. 3-9: Příprava tiskárny k tisku.



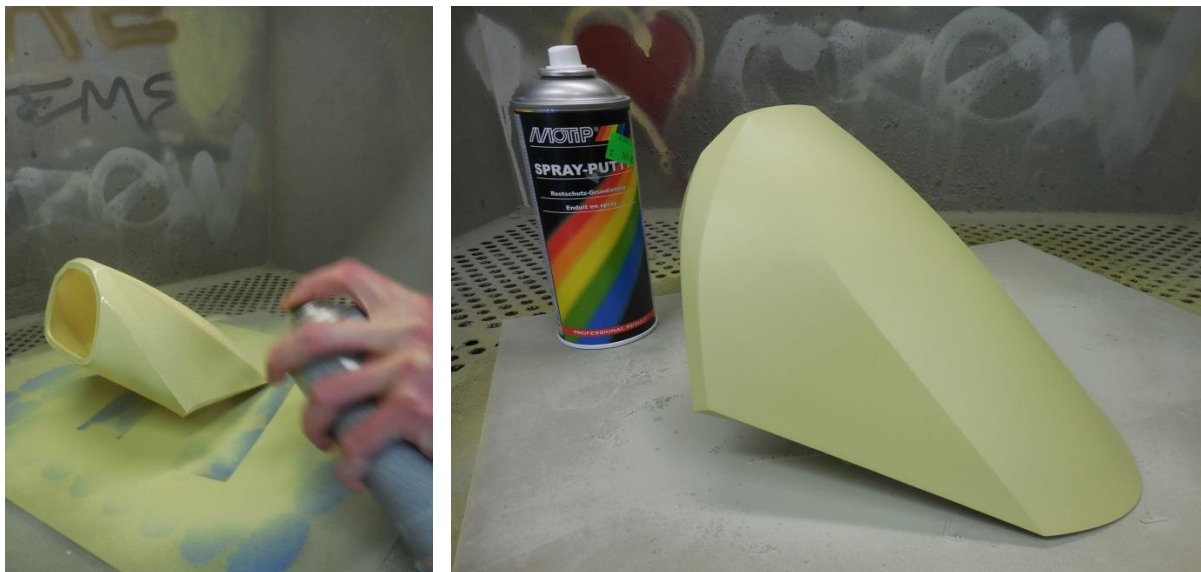
Obr. 3-10: Zahájení tisku.



Obr. 3-11: Průběh tisku.

Z ekonomických důvodů byla využita na tisk master modelu metoda FDM. Výhodou je nízká cena tisku včetně ceny tiskárny, dále vyšší teplotní odolnost a houževnatost. Záporným znakem této technologie je příliš vysoká minimální výška tištěné vrstvy, která se na povrchu modelu projevuje zvýšenou hrubostí. Průběh tisku je zachycena na Obr. 3-10 a 3-11.

Pro výrobu kvalitní silikonové formy, a tedy prototypového modelu metodou gravitačního lití, je nutné hrubost povrchu snížit. Toho je dosaženo opakovaným nástřikem např. karosářského tmelu a jeho broušením (Obr. 3-12). Tato procedura se aplikuje pouze na vnější povrch modelu. Povrch dutiny se pouze pokryje tenkou vrstvou nástřiku bez broušení. Protože se nejedná o pohledovou část modelu, je tato úprava dostatečná. Po dokončení této procedury je model připraven pro výrobu silikonové formy a jádra.



Obr. 3-12: Úprava povrchu master modelu.

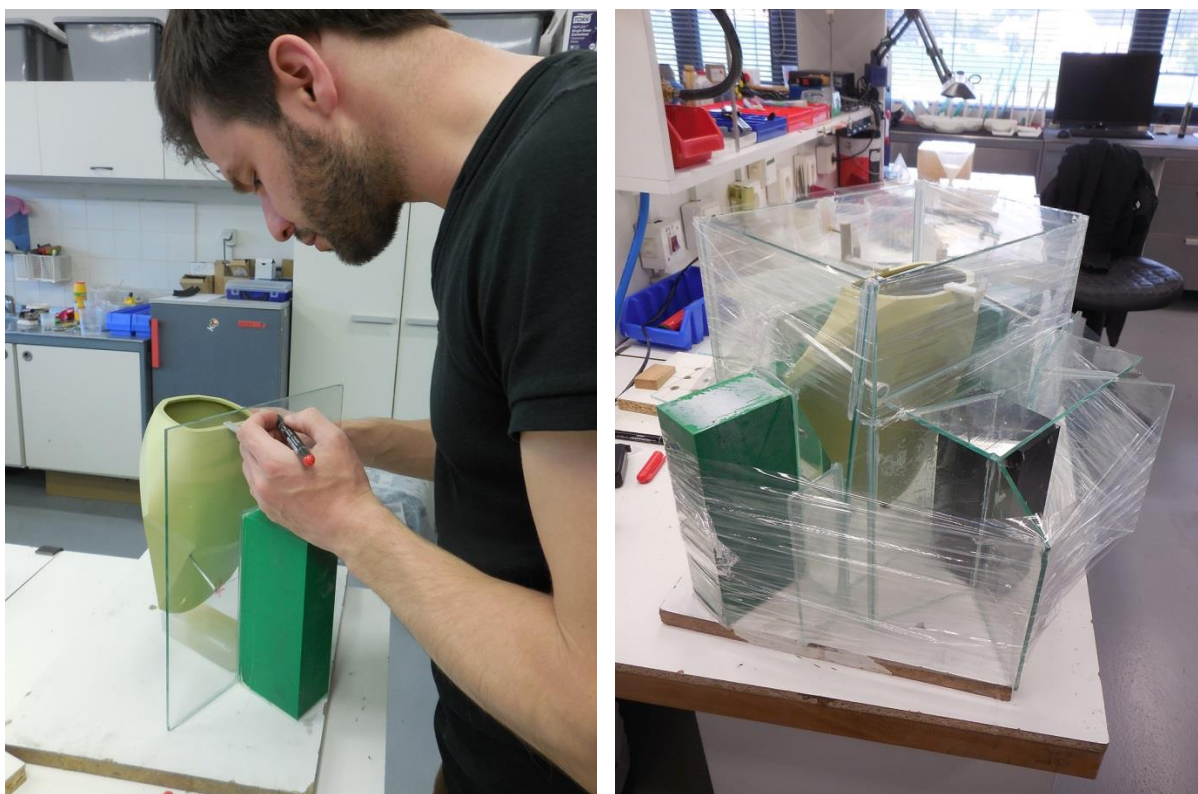
3.3 VÝROBA JÁDRA A FORMY PRO SILIKONOVOU FORMU

Jeden z cílů výroby prototypového modelu byla výroba modelu z jednoho kusu bez nutnosti montáže dílčích částí. Negativní úhly dutiny pro konvenční metody jako je např. vstřikování plastu činí tento požadavek nedosažitelný. V případě silikonové formy a malosériové výroby je však možné výroby modelu bez dělení docílit. Pro dutinu je nutné vytvořit jádro, které bude možné po vytvrdnutí silikonové formy vyjmout i přes negativní úhly. Pro tento účel je nutné vytvořit třídílné jádro (Obr. 3-13). Opět pro tuto část bylo využito 3D tisku FDM. Tvar jádra byl dosažen odsazením vnitřní plochy modelu o 15 mm. Jádro se posléze rozdělilo na tři kusy, aby je bylo možné vyjmout po zalití dutiny mezi jádrem a vnitřní plochou master modelu. Jádro je pro dosažení dostatečné tuhosti tištěno v plném objemu metodou *Sparse*. V každém kuse jsou připraveny dutiny pro našroubování závitových tyčí, které budou později sloužit k uchycení a fixování jádra v dutině master modelu.



Obr. 3-13: Jádru modelu.

Forma pro silikonovou formu je tvořena ze skleněných desek spojených tavným lepidlem a dle potřeby stabilizovaných hranoly a dalšími skleněnými destičkami. Master model je do prostoru skleněné formy fixován navrtnými distančními kovovými tyčinkami a obdobně vtokem, který je k modelu přilepen. Během gravitačního lití by mohlo dojít k malému rozevření formy působením tlaku lící kapaliny, a proto jsou dělicí roviny dodatečně jištěny mezi sebou šrouby. Ty jsou uchyceny dle dělicích rovin na stěny skleněné formy tavným lepidlem. Poslední pojistná fixace formy proti roztržení působením tlaku silikonu je potravinářskou páskou omotanou kolem formy (Obr. 3-14).



Obr. 3-14: Příprava skleněné formy pro odlití silikonové formy.

Po dokončení formy byl připraven silikon pro zalití master modelu. Zalití neprobíhalo v jednom kroku, ale nejprve byla zalita pouze cca jedna třetina výšky, aby se fixovala poloha master modelu pro vsazení a fixování jádra.

Silikon pro zalití se připravoval jako dvousložková směs. Základ tvoří *XIAMETER® RTV-4234-T4* od firmy *Ebalta* a k němu příslušné suché tvrdidlo od stejné firmy. Suché tvrdidlo je jedna z variací tvrdidel, která na rozdíl od olejového nezanechává na odlitém modelu tenkou vrstvu mastného povrchu a je možné bez dalších úprav povrch např. lakovat. Nevýhodou suchého tvrdidla je však nižší trvanlivost formy, která se dostává do styku s licím materiálem modelu za vzniku chemických reakcí, popř. bývá zahřívána během tvorby modelu. Po několika cyklech gravitačního lití může dojít k adhezivnímu spojení mezi formou a modelem. V takovém případě dochází často při odpojení modelu od formy k jejímu poškození. Olejové tvrdidlo způsobuje po vytvrdnutí směsi neustálou obnovu tenké mastné vrstvičky na povrchu formy. Ta zamezuje pevnému spojení licího materiálu modelu a formy. Rovněž nedochází během vystavení vyšším teplotám ke ztrátě plasticity a houževnatosti.

Smíchání bylo provedeno vrtačkou s metlou. Protože se během míchání výrazně navýšilo množství vzduchu ve směsi, je nutné jej odstranit. V opačném případě by silikon měl po vytvrzení silně pórovitou strukturu. Odstranění vzduchu ze silikonu se provádělo ve vakuové komoře po dobu 15 min. Zajímavým efektem byl nárůst objemu směsi vlivem expandování vzduchových bublinek (Obr. 3-15). Po odstranění vzduchu ze směsi následovalo zalití cca jedné třetiny formy. Pro zamezení vytlačení master modelu, byl do dutiny modelu vložen kus zatuhlého silikonu adekvátní hmotnosti. Před započítím lití byl na vnější i vnitřní část master modelu nastříkán separátor, aby nedošlo k příliš pevnému spojení se silikonem. Stejně tak bylo nastříkáno i jádro pro snadnější vytažení.

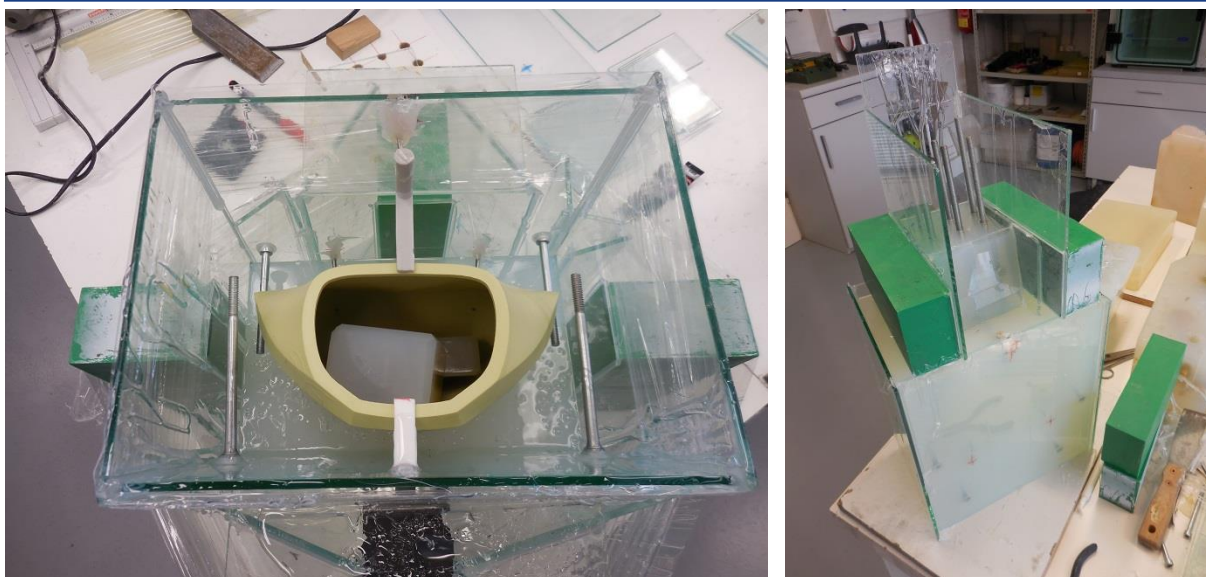
Namíchanou směs je možné zpracovávat 90 min. při teplotě 23 °C. Tuhnutí pro dosažení optimálních vlastností se děje pod dobu 12 hod. Tuto dobu je možné zkrátit navýšením okolní teploty na 30 až 35 °C. Tento postup se však nedoporučuje.



Obr. 3-15: Příprava skleněné formy pro odlití silikonové formy.

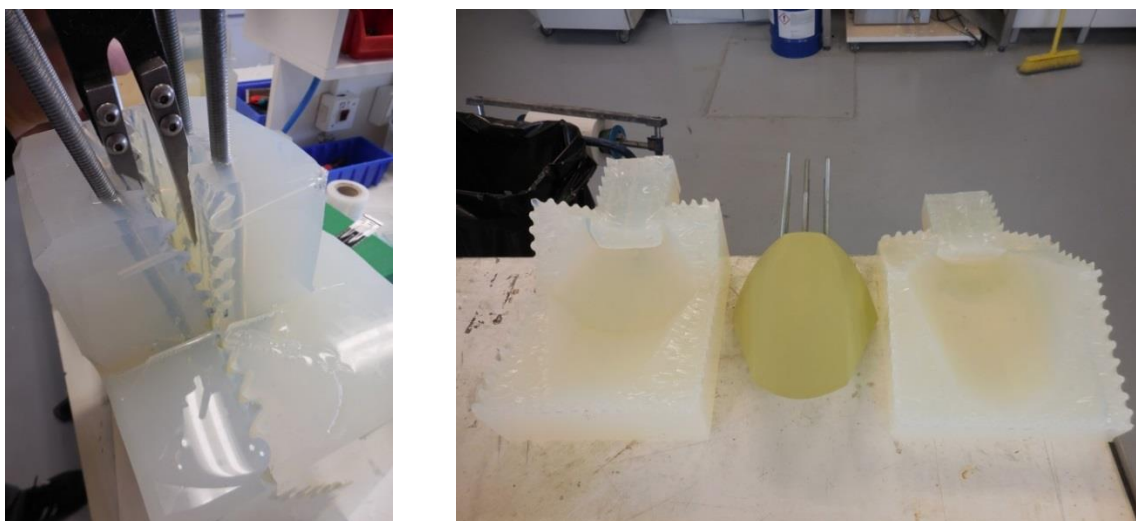
Po zatuhnutí první vrstvy silikonu byla zátěž vložená do dutiny adekvátně navýšena a doplněn objem dutiny kolem již stabilizovaného master modelu na úroveň otvoru. Po zatuhnutí této vrstvy byl model dostatečně stabilizovaný na vložení jádra. Byly vloženy nejdříve krajní části a následně část středová. Rozepřením závitových tyčí provizorními deskami s otvory se jednotlivé díly vůči sobě stabilizovaly a následně byla celá soustava uložena na již vytvrzenou část formy. Jádro nemuselo být odsazené stejně od všech stěn, ale snahou bylo docílit rovnoměrného odsazení ve všech částech. Následovalo zalití jádra až po jeho horní úroveň. Tím vznikla pružná blána tloušťky cca 1 cm, která kopíruje stěnu dutiny master modelu a definuje tak vnitřní stěnu dutiny pro gravitační lití. Po vytvrzení silikonu obklopující pevné jádro byl na vršek celého jádra nanesen separátor, aby nedošlo ke spojení s následující vrstvou silikonu.

Ze závitových tyčí byly odstraněny desky a celé jádro bylo zalito další vrstvou silikonu (Obr. 3-16). V případě, že není na silikon nanesen separátor, dochází ke spojení již zatuhlé vrstvy s nově nalitou. Po zatvrdnutí nalité vrstvy byla forma v místě závitových tyčí nadstavěna, aby byly dostatečně fixovány pro následné gravitační lití.

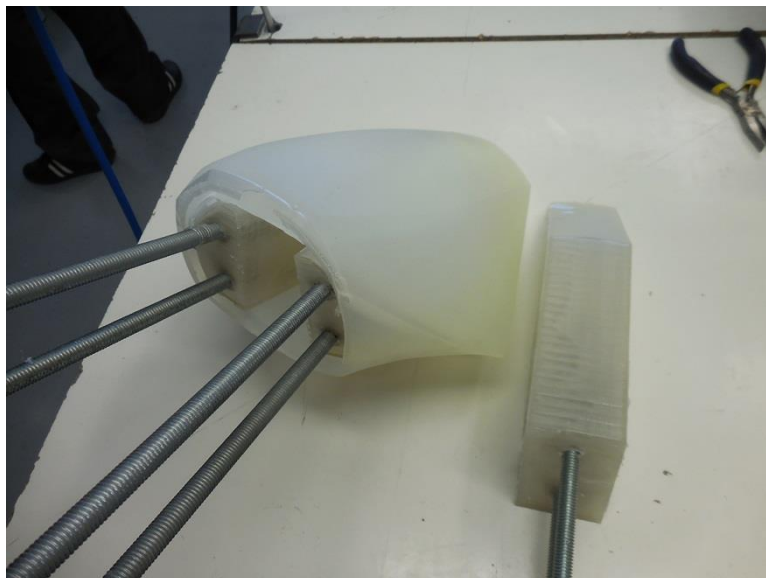


Obr. 3-16: Odlití formy.

Po zatuhnutí poslední vrstvy silikonu se provedlo odformování, vyjmutí fixačních šroubů a vyznačení dělicí roviny. Ta byla definována tak, aby nedošlo ke vzniku výrazných negativních úhlů v dutině formy. Rozdělení formy na její části se provádí pomocí skalpelu a to tak, že se v prvním tahu řezu vytváří zámek. Ten vzniká specifickým pohybem skalpelu po sinusoidě během tahu po vyznačené dělicí rovině. Sinusoidu však musí vykonávat pouze vnější část skalpelu a špička, která je do formy zanořena nejvíce, by se měla pohybovat po obdobné křivce, jako je ta vyznačující dělicí rovinu. Takto vznikají na obou částech formy opakující se konkávní a konvexní zámky, které do sebe s vysokou přesností zapadají. Zbývající objem formy se již rozřezává bez tvorby zámků. V horní části formy v blízkosti závitových tyčí bylo složitější dostat se skalpelem do hloubky modelu k rozdělení na dvě části a následné odtržení obou polovin v této části vyžadovalo větší sílu (Obr. 3-17).

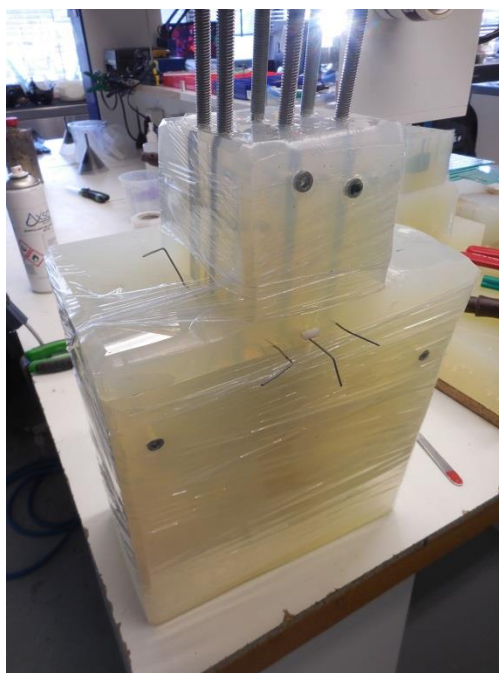


Obr. 3-17: Dělení formy.



Obr. 3-18: Jádru formy.

Před složením formy pro gravitační lití je nutné opět použít separátor pro veškeré povrchy, které přijdou ke styku s licím materiálem. Části formy se opět spojí vložením dříve odebraných šroubů. Dodatečné zajištění formy se provádí sponkováním po obvodu dělicí roviny nebo obepnutím formy potravinářskou fólií. V tomto případě byla použita fólie. V horní části formy držící závitové tyče bylo dodatečně použito svorek a přiložených desek z důvodu výskytu malé netěsnosti mezi polovinami formy. Po zkompletování formy se pomocí zasunutí tenkých drátků při horním okraji dutiny pro lití vytvoří odvodušňovací kanálky (Obr. 3-19). Během lití po dosažení licího materiálu horní části dutiny se drátky odstraní, aby nedošlo k vytékání materiálu.



Obr. 3-19: Kompletace formy.

Jako licí materiál byla použita polyuretanová dvousložková rychletuhnoucí pryskyřice pro odlévání ve vakuu PX 223HT vyráběná firmou Axson spadající do koncernu Sika. První složka je označena jako PX 223HT ISO a druhá PX 223HT POLYOL fungující jako tvrdidlo. Tyto složky se míchají v poměru 5:4. Po důkladném promíchání tvrdidla byla forma a obě složky v miskách vloženy do vakuové komory a vakuovány. Složka PX 223HT ISO je během vakuování průběžně promíchávána. Po dobu 10 min. byl tlak v komoře snížen na 30 milibarů, aby nedošlo k vypěnění tvrdidla rychlým snížením tlaku na nejnižší hodnotu. Následně se hodnota tlaku v komoře snížila na 5 min. na nulovou hodnotu. Po smíchání obou složek se po dobu 1 minuty promíchávaly a následovalo odlévání do formy přes upevněnou nálevku k vtoku formy (Obr. 3-20). Po dosažení licího materiálu horní části dutiny byly odvzdušňovací drátky odstraněny.



Obr. 3-20: Odlévání modelu.

Po zatuhnutí pryskyřice, které nastalo po cca 5 až 7 minutách byla forma spolu s odlitým modelem vložena pro vytvrzení do pece. Běžně se vytvrzuje při teplotě 70 °C po dobu 1 hodiny, ale v našem případě se jedná o objemnější model a v některých místech o výrazně vyšší tloušťku stěny formy než je obvyklé. Z toho důvodu se pec nastavila na teplotu 80 °C a temperovalo se po dobu 2 hodin, aby došlo k plnému prohřátí formy včetně jádra. Po vyjmutí formy a jejím vychladnutí byl odlitek vyjmut (Obr. 3-21 a 3-22). Vzhledem k drobným nepřesnostem zaformování došlo k zátokům pryskyřice v místech spojů formy, které byly odstřiženy

a následně jemně zabroušeny. Před zaformováním bylo uvažováno vložení distančních tyčinek ve spodní části modelu v místech případných šroubů pro uchycení k přednímu světlu motorky, které by zajišťovaly udržení přesné distance jádra od okolních stěn formy. Předpokládalo se však, že téměř vertikální uložení jádra a zvýšená část horní části formy zajistí udržení správné polohy jádra. Během prvního odlitku se však tento předpoklad nepotvrdil a jádro se při spodní části, pravděpodobně gravitačním působením a relativně pružným uložením, vyhnulo, respektive otočilo, kolem místa uchycení tyčí o cca 2 až 2,5 mm.



Obr. 3-21: Odformování modelu.



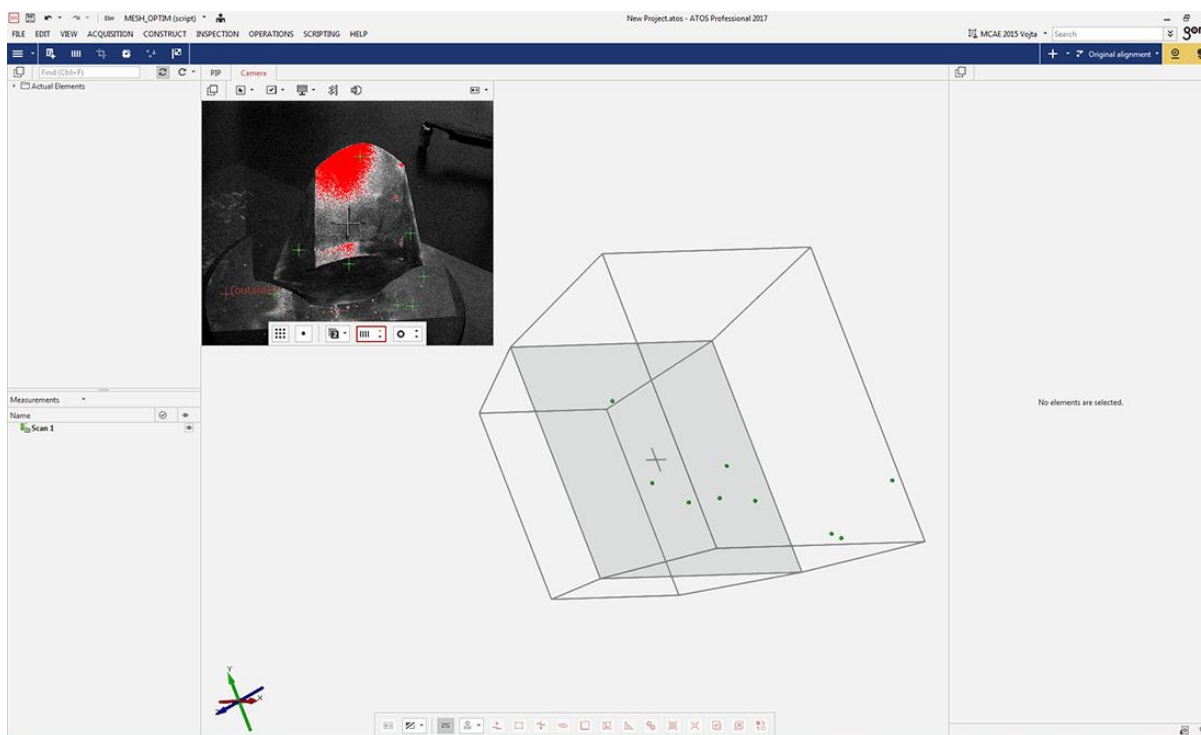
Obr. 3-22: Odlitek krytu tachometru.

4 3D DIGITALIZACE PROTOTYPOVÉHO DÍLU

Pro digitalizaci prototypového dílu a jeho následné porovnání s virtuálním 3D modelem bylo využito nekontaktní optické metody 3D skenování. Pro skenování byl využit adekvátní skener AtosCore 300 společnosti GOM využívající ke skenování strukturované (různé proužky) modré úzkopásmové LED světlo, dvou kamer a triangulační metodu výpočtu. Díky dvěma kamerám snímajícím stejný světelný vzor na povrchu objektu vzniká fázový posun světla založený na sinusoidním rozložení intenzity na snímačích kamer. Tento typ skeneru snímá plochu 300x230 mm. Vzdálenost bodů ve vytvářeném mračnu bodů činí 0,12 mm. Obvyklá přesnost při běžných podmínkách se pohybuje v setinách milimetrů.

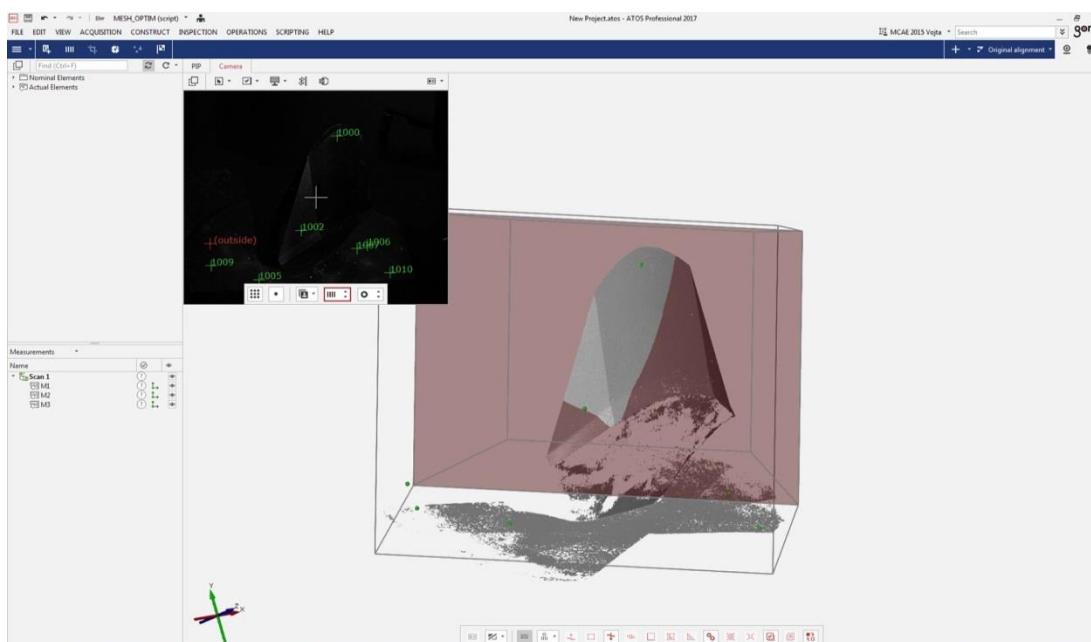
Na model je nutné nanést referenční body pro usnadnění softwaru ATOS rozeznání polohy modelu vůči skeneru a předcházejícím měření. Při každém snímání musí skener detekovat alespoň 3 body. Tyto body se volí dle velikosti měřeného objektu od 0,8 mm do 18 mm. V našem případě byly použity body o průměru 1,5 mm a body byly nanесeny i na otočnou platformu modelu.

Světelná citlivost kamer musí být nastavena tak, aby model nebyl snímán přesvětlený (Obr. 4-1) nebo naopak nedostatečně osvětlený. Je možné nastavit horní a spodní limit. Tato funkce výrazně pomáhá u tvarově složitých modelů vyvážit expozici. Přesvětlené části program ATOS zvýrazní červeně.

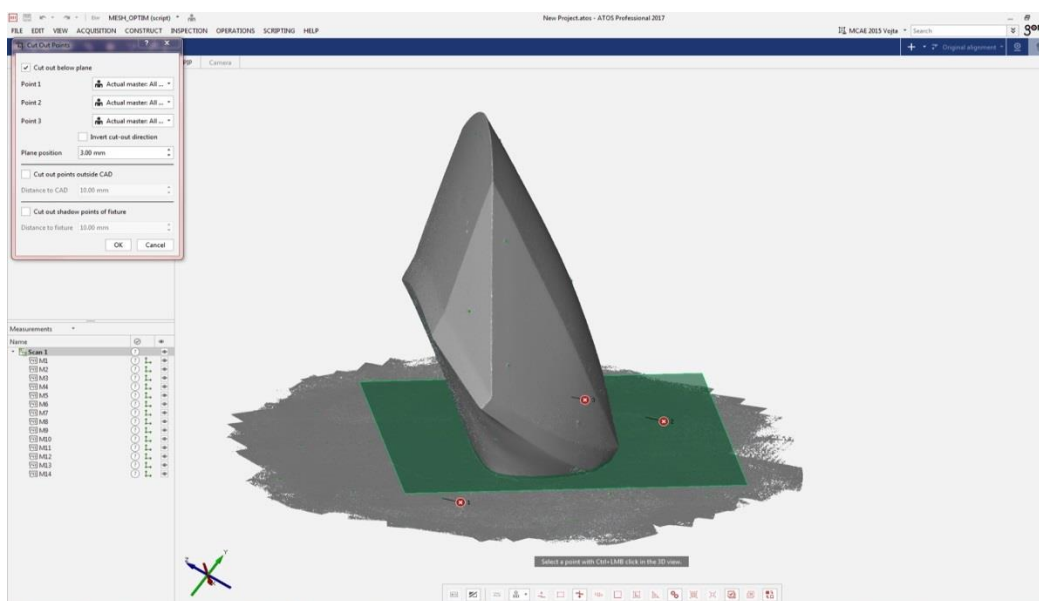


Obr. 4-1: Nastavení expozice kamer.

Po nastavení světelné citlivosti, rozmístění referenčních bodů, přesnosti atd. může začít postupné skenování (Obr. 4-2). 3 referenční body na modelu pro zarovnání skenované části ke zbytku modelu musí vidět obě kamery. Skenování probíhá v sériích. V každé sérii se provádí několik měření z různých úhlů dle potřeby, během kterých nesmí být změněna poloha modelu vůči podložce. Došlo by tak k narušení triangulačního výpočtu, protože podložka je rovněž snímána. Jelikož podložka nemá být součástí výsledného 3D modelu, musí být z nasnímaného modelu v každé sérii odstraněna. To se provádí označením alespoň 3 referenčních bodů podložky, kterými se určí řezná rovina (Obr. 4-3). Ta se od skenované části podložky odsadí dle uvážení (běžně postačí pár milimetrů) a část podložky je od zbytku modelu odříznuta.



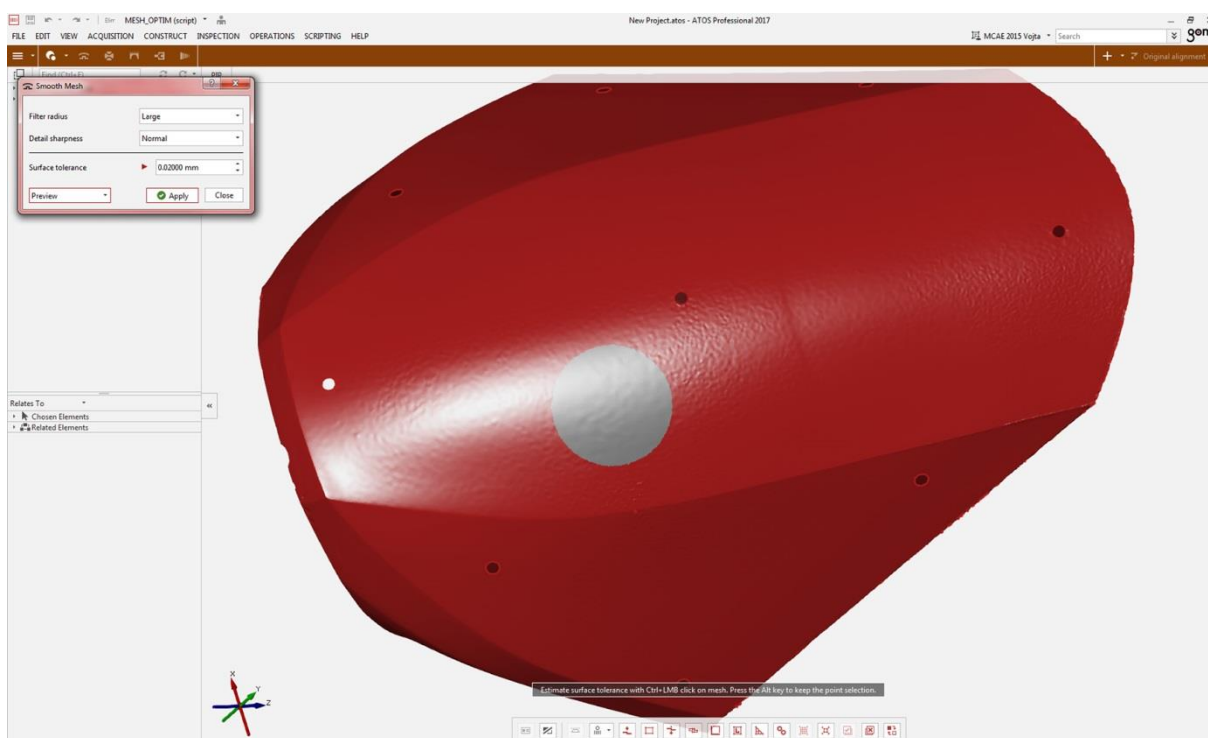
Obr. 4-2: Skenování.



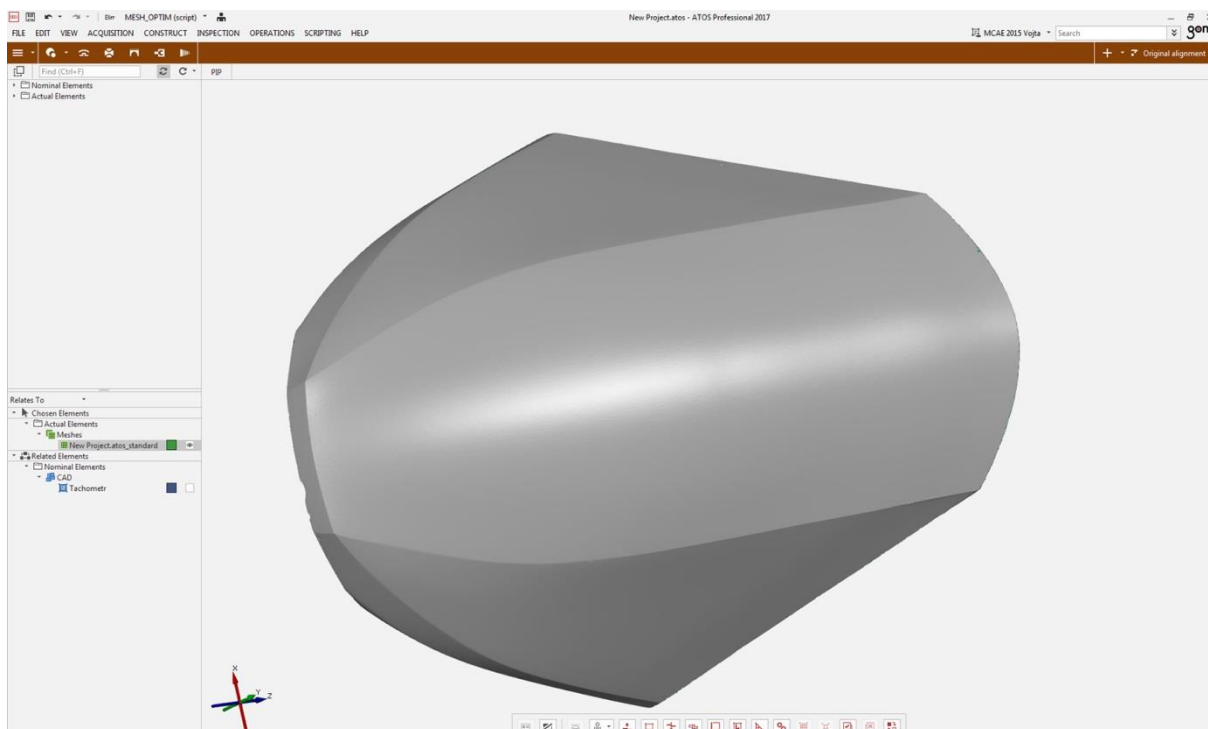
Obr. 4-3: Označení řezné roviny.

Po dokončení první série měření je nutné obrátit model pro měření části modelu, kterou kamery nemohly snímat. Založila se nová série měření a skenovala se dříve zakrytá část modelu a částečně již nasnímaná část modelu s referenčními body. Pro zarovnání dvou sérií měření se aktivuje v programu ATOS pouze skenování měřicích bodů a provede se zarovnání referenčních bodů z obou sérií skenování příkazem „*Transform by reference point*“. Vyberou se 3 referenční body společné oběma sériím a dojde k jejich zarovnání. Pro přesnější zarovnání se posléze určí další body.

Výsledný model je hrubý model vzniklý polygonizací mračna bodů získaného během skenování. Tento model je nutné vyhladit. Ve většině případů je dostatečné zadat standardní kvalitu vyhlazení, která byla použita i v tomto případě (Obr. 4-4). Následně se provedla redukce polygonu, aby výsledná data nebyla zbytečně velká. Redukce se provádí na základě maximální délky hrany polygonu a maximální odchylky plošky polygonu od původní plošky. Po dokončení těchto operací se uzavřou díry po referenčních bodech. Díry jsou detekovány programem ATOS po kliknutí myši poblíž díry. Pro uzavření děr se zadává jak velká okolní plocha má být použita k aproximaci plochy potřebné pro uzavření díry. Finální krokem je opětovné vyhlazení modelu (Obr. 4-5).



Obr. 4-4: První vyhlazení modelu.

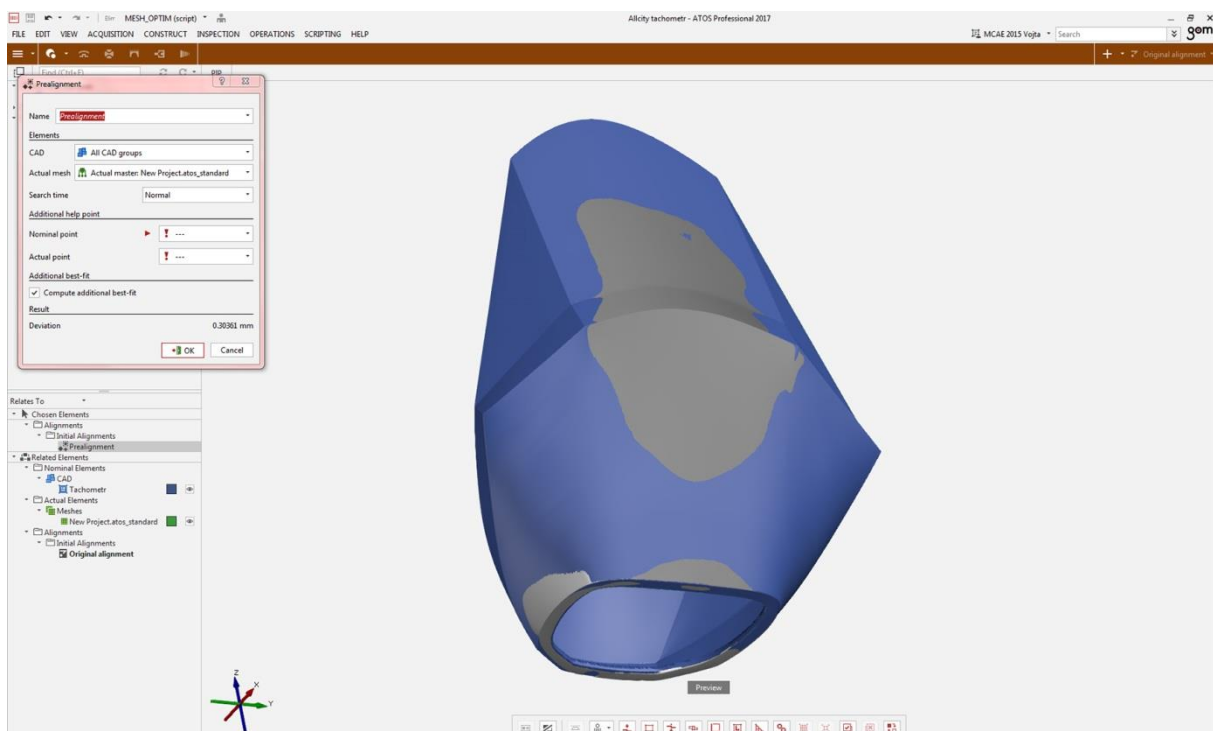


Obr. 4-5: Druhé vyhlazení modelu.

5 ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT – POROVNÁNÍ S ORIGINÁLEM

Pro porovnání naskenovaného modelu s originálním modelem vytvořeným v programu Rhinoceros bylo použito softwaru ATOS INSPECTION dodávaného společností Gom. Software je po několika letech vývoje uživatelsky příjemný a do značné míry intuitivní. Velká část operací je již automatizovaná.

Po dokončení skenování a úprav modelu byl importován do modelového prostoru originální model ve formátu STL. Příkazem „*Prealignment*“ se model automaticky v maximální míře zarovná ke skenovanému modelu (Obr. 5-1). Skenovaný model se nám zobrazoval jako šedý a původní skenovaný model modrý.

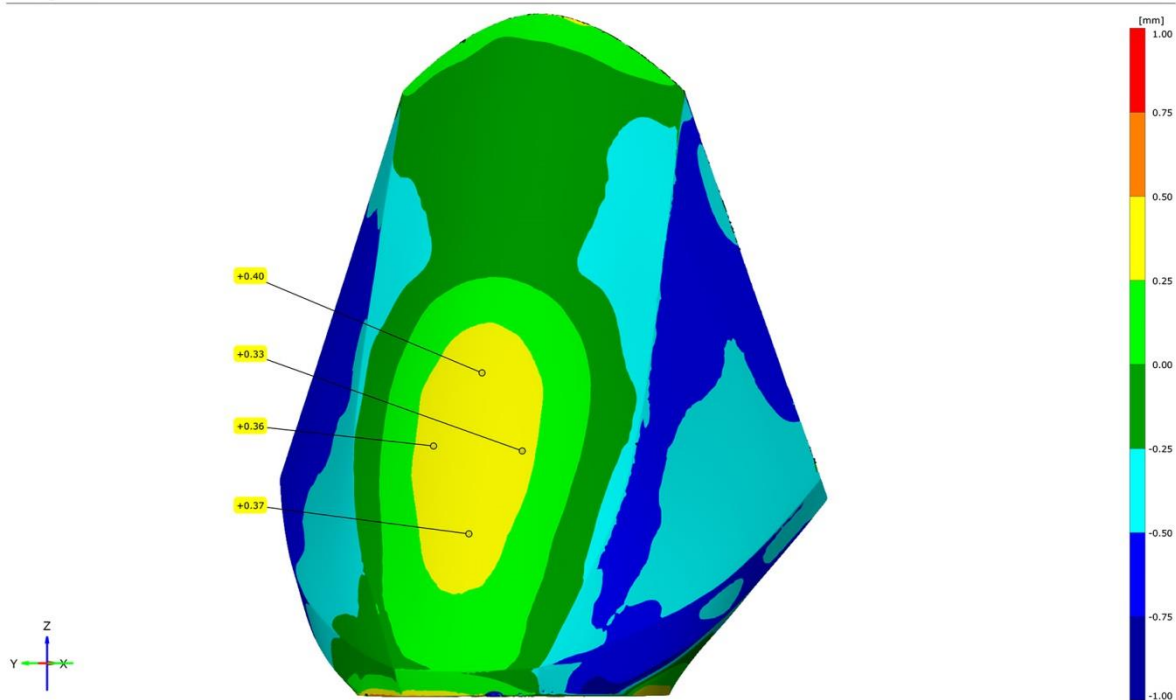


Obr. 5-1: Zarovnání skenovaného modelu s originálem.

Při pohledu na zarovnané modely je zřejmé, že se nám skenovaný model liší od originálního modelu. Dalším krokem tedy bylo vyhodnocení reálných odchylek a vykreslení několika pohledů s barevným gradientním podáním odchylek s příslušnou stupnicí a několika bodů s přesnými odchylkami (Obr. 5-2). Celý měřicí protokol je součástí přílohy č. 2.

Untitled
Prealignment

10/10

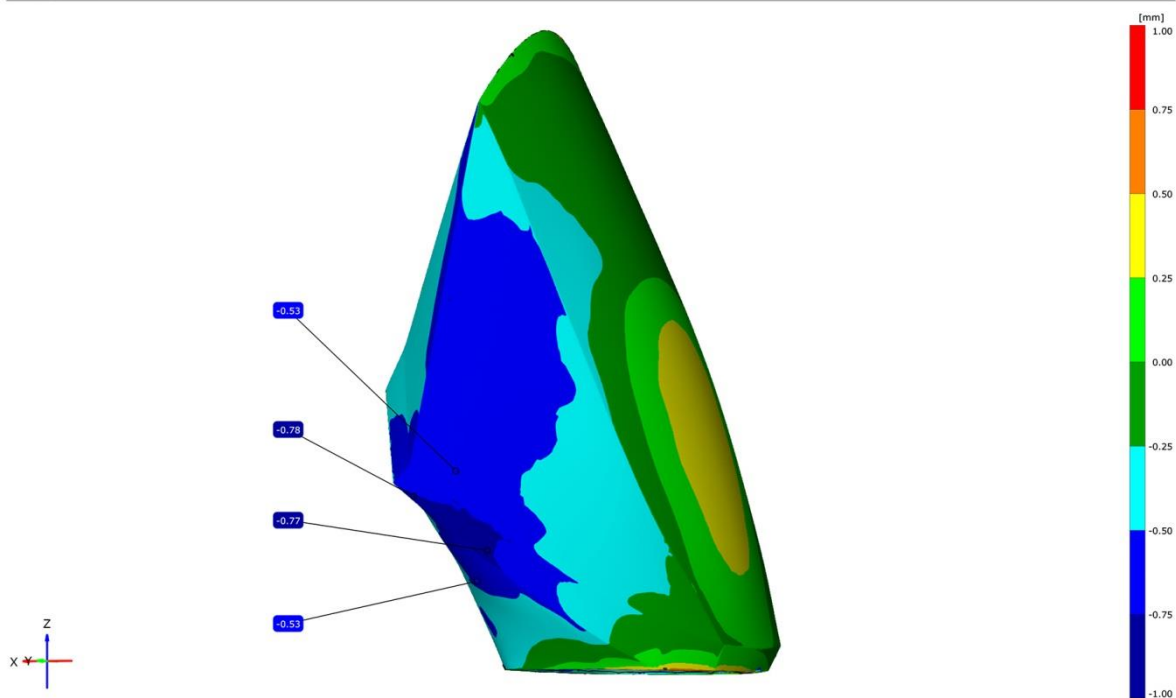


MCAE Systems, s.r.o. | mcae@mcae.cz | GOM Inspect Professional 2017-RC1 | ATOS III rev.02 Triple Scan | MV700 | 23°C |
Miele | Seitenwand | 1 | 5/26/16 | Contest |

MCAE

Untitled
Prealignment

9/10



MCAE Systems, s.r.o. | mcae@mcae.cz | GOM Inspect Professional 2017-RC1 | ATOS III rev.02 Triple Scan | MV700 | 23°C |
Miele | Seitenwand | 1 | 5/26/16 | Contest |

MCAE

Obr. 5-2: Vyhodnocení odchylek.

Z porovnání skenovaného modelu s originálem vyplývá, že během procesu výroby prototypového odlitku došlo k odchýlení master modelu nebo formy popř. kombinace od originálního 3D modelu.

Odchylka v tloušťce stěny při spodní straně modelu byla způsobena rotací jádra v důsledku gravitačního působení o rozhodnutí o nepoužití distančních tyčinek pro nenarušení povrchu modelu. Vzhledem k pružné povaze silikonové formy a závitových tyčí však při dalším odlévání budou tyto distanční tyčinky použity a bude tak zajištěno dodržení původní tloušťky stěny. Distanční tyčinky by byly aplikovány v místech budoucích šroubů fixujících tachometr ke světlu pod ním.

Drobné lokální odchylky kolem ústí dutiny modelu jsou způsobeny pohybem jádra a uvolněním bubliny během odlévání, kterou se nepodařilo před zatuhnutím odstranit. V dalším odlévání je na základě této zkušenosti možné jinak situovat odvodušňovací kanálky a provést důkladnější vakuování.

Odchylky měřené na vnějším plášti modelu jsou pravděpodobně způsobeny z části drobnými odchylkami master modelu a deformací silikonové formy. Tu pravděpodobně způsobilo dosmrštění po odformování master modelu. Částečně se na deformaci může podílet i vlastní váha formy, která byla ustavena na výšku, aby těžiště jádra bylo co nejbližší vektoru gravitační síly působící na jádro. Na základě této zkušenosti by bylo vhodné v obdobných případech volit raději horizontální polohu modelu, pokud to tvar a technologické požadavky umožní. Dále lépe promyšlené provedení jádra by snížilo vzniklé nepřesnosti. Během oddělování formy, bylo nutné užít větší sílu k rozevření dvou částí forem a do formy tak mohla být vložena jistá deformace. Jednotlivé díly jádra by např. mohly být k sobě lépe fixovány užitím pera a drážky na vnitřních kontaktních stěnách. Dále by bylo výhodnější jádro při horní straně přizpůsobit otvoru dutiny tak, aby její tvar kopírovalo a mírně z dutiny vystupovalo.

6 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Podnik, který se snaží na trhu udržet, nebo se na něj dostat, si nevystačí jen s promyšlenou reklamní kampaní, vybudovanou sítí odbytových cest a rozváženou cenovou politikou. Bez ohledu na obor, ve kterém se pohybujeme, si obvykle první názor na produkt uděláme z vizuálního prozkoumání. Dále tržní ekonomika nutí neustále bojovat o přízeň zákazníků obnovováním a zdokonalováním svého portfolia. Výrazněji se tyto aspekty projeví v oborech, kde je design silným faktorem ovlivňující zákaznicko rozhodnutí o koupi, a kde je životní cyklus výrobku relativně krátký. Automobilový průmysl zajisté mezi tyto obory patří a neustálá technologická inovace se promítá i do nového designového pojetí výrobků. Návrh, vývoj a výroba nového produktu, respektive prototypu, je finančně nákladná, a v rámci této práce jsou porovnány možnosti využití moderních technologií ke snížení ceny prototypové výroby v porovnání s konvenčními metodami viz Tabulka 7 a obr. 4-1 až 4-3. Konkrétně se jedná o výrobek z plastu, který by se vyráběl ročně v malých až středních sériích.

Aby byla odhadovaná cena pro obě metody výroby relevantní, byly ceny konzultovány se společnostmi zabývajícími se výrobou vstřikovacích forem a prototypovou výrobou. Náklady na výrobu hliníkových vstřikovacích forem byly konzultovány se společnostmi Festool s.r.o. a KP-Kopro s.r.o. Náklady na výrobu prototypového výrobku metodou 3D tisku, popř. vstřikovací formy a formy pro vakuové lití, se konzultovaly se společností MCAE Systems s.r.o.

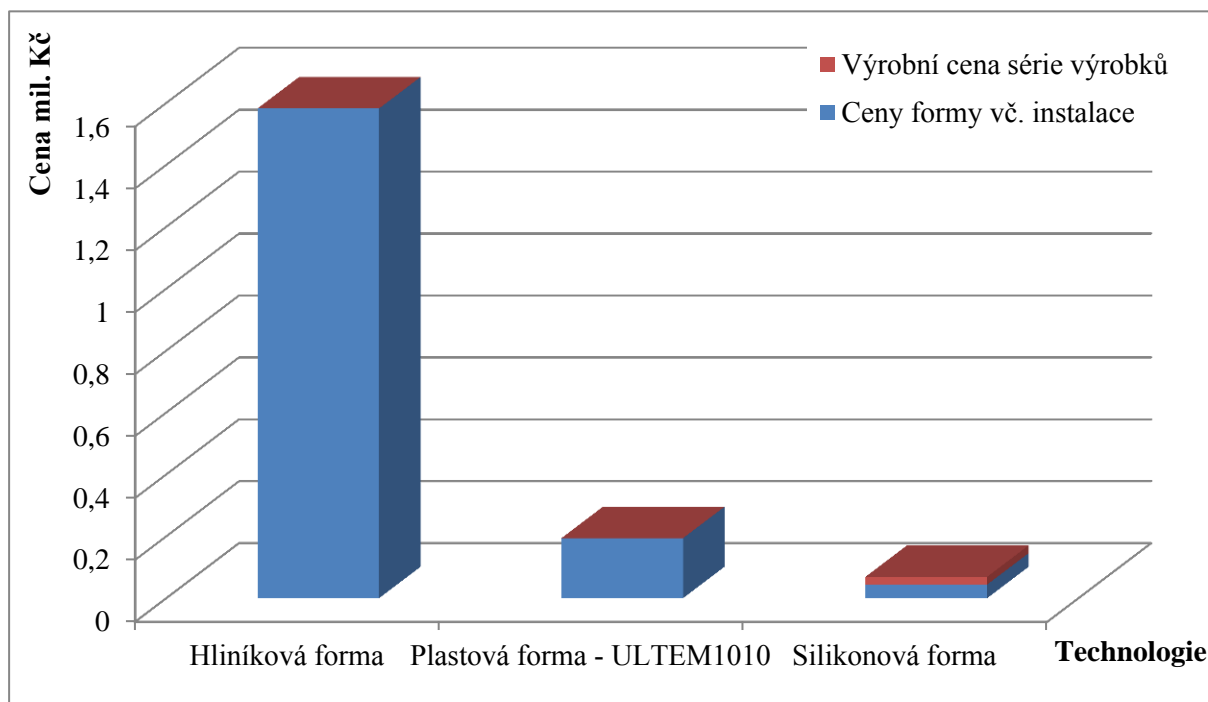
Navržený tvar není možné technologií vstřikování plastů vyrobit jako jeden kus a bylo by nutné výrobek rozdělit na dvě části a následně je spojit. Vstřikovací formu tedy bude nutné provést ve dvou provedeních pro pravou a levou část výrobku.

Tabulka 7: Kalkulace ceny výroby prototypu dle použité technologie.

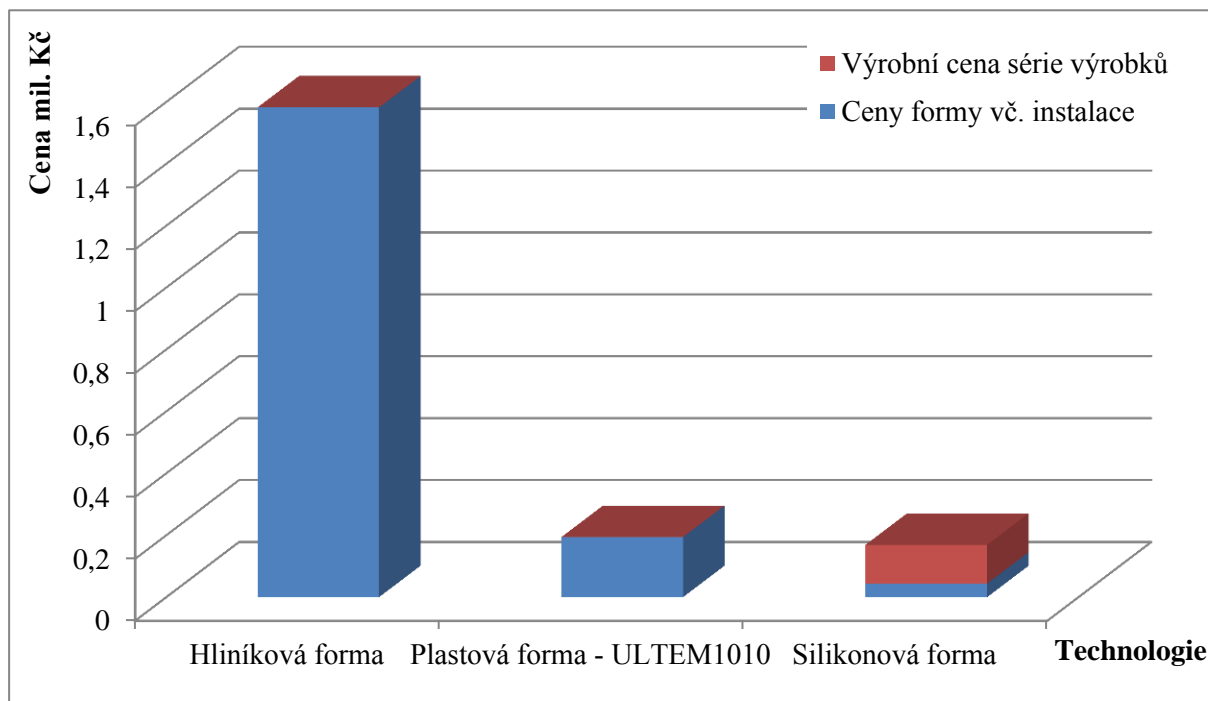
VSTŘIKOVÁNÍ PLASTU, HLINÍKOVÁ VSTŘIKOVACÍ FORMA		
položka		Cena (Kč)
nástroj 1ks	návrh konstrukce	66 200,-
	materiál	280 700,-
	výroba a montáž	428 000,-
	programování, optimalizace	16 200,-
nástroj 2ks celkem		1 582 200,-
1ks dílu		1,20
doba dodání		12KT

VSTŘIKOVÁNÍ PLASTU, PLASTOVÁ VSTŘIKOVACÍ FORMA VYROBENA 3D TISKEM, UCHYCENÍ NA OCELOVOU DESKU BEZ VYHAZOVAČŮ		
položka		Cena (Kč)
nástroj 1ks	návrh konstrukce	35 000,-
	materiál	32 300,-
	výroba a montáž	14 500,-
	programování, optimalizace	15 200,-
nástroj 2ks celkem		194 000,-
1ks dílu		3,70
doba dodání		2KT

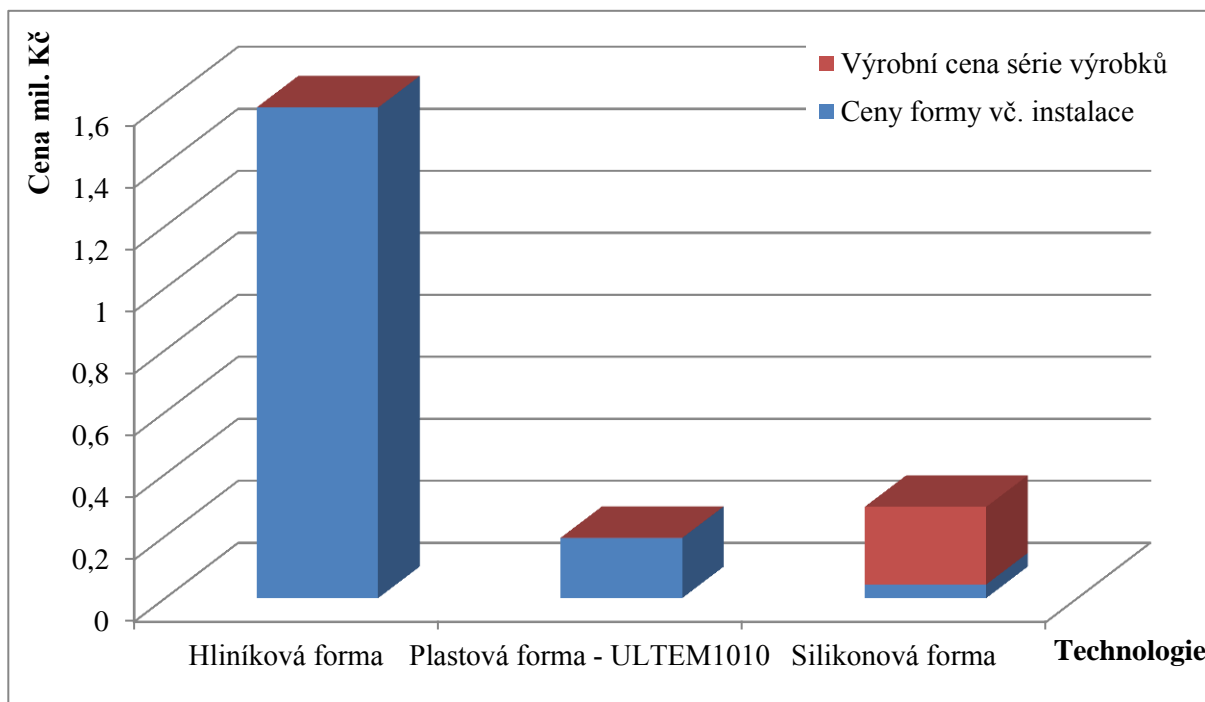
VAKUOVÉ LITÍ PLASTŮ, SILIKONOVÁ FORMA VYROBENA NA ZÁKLADĚ MASTER MODELU VYROBENÝM 3D TISKEM FDM		
položka		Cena (Kč)
nástroj 1ks	návrh konstrukce	5 000,-
	materiál, 3D tisk	18 500,-
	výroba a montáž	20 500,-
	programování, optimalizace	-
nástroj 1ks celkem		44 000,-
1ks dílu		2 500,-
doba dodání		2KT



Obr. 4-1: Porovnání nákladů na výrobu série 10 ks.



Obr. 4-2: Porovnání nákladů na výrobu série 50 ks.



Obr. 4-3: Porovnání nákladů na výrobu série 100 ks.

Při pohledu na grafy (Obr. 4-3) je zjevné, že metoda vakuového lití je při výrobě do cca 50 ks ekonomicky výhodnější. Protože v rámci cenového porovnání není zahrnuta kompletace dvou polovin tachometru v případě vstřikování plastů, tak by toto číslo bylo dokonce o něco vyšší za předpokladu, že doba dodání nebude hrát roli. Vakuové lití je zdlouhavější proces ve srovnání se vstřikováním plastu a tedy v případě, že je časová prodleva mezi objednáním a dodáním pro výrobce ekonomicky významná, tak by konečné množství kusů, které se vyplatí vyrábět metodou vakuového lití, bylo nižší. Dá se však předpokládat s velkou jistotou, že sérii 10 ks bude nejvýhodnější dodávat metodou vakuového lití.

Z technického a technologického hlediska si vakuové lití stojí ve srovnání s porovnávanými metodami velice dobře na poli adaptability výrobního procesu. Často je možné vyrobit i složité tvary s negativními úhly bez dělení modelu na více kusů. Nevýhodou této metody by mohla být předpokládaná nižší přesnost. Protože se v našem případě jednalo o první odlitek a první testování vakuového lití, tak naměřené odchylky nelze brát jako směrodatné pro určení přesnosti této metody. Po konzultaci ve společnosti MCAE, která se výrobou prototypů touto metodou zabývá, lze říci, že vakuové lití může dosahovat přesnosti v řádech setin milimetru v závislosti na tvaru, rozměrech a zvoleném pracovním postupu. Je tedy vyžadována jistá zkušenost a dodržování předepsaných technologických postupů při odlévání.

ZÁVĚR

Přestože některé z užitých technologií v rámci této práce nebyly vynalezeny v několika posledních letech, tak jejich rychlý vývoj a rozmach bezesporu do poslední dekády patří. Především se jedná o technologii 3D tisku. Za předpokladu, že i nadále bude jeho rozvoj probíhat tímto tempem, se dá očekávat, že si tato technologie najde cestu do většiny průmyslových i jiných oborů a nahradí některé konvenční technologie při malosériové a středně sériové výrobě. V neposlední řadě se stává tento způsob rychlé tvorby prototypu důležitým nástrojem designérů, společnostem věnujícím se vývoji prototypových dílů a dalším. 3D tisk při výrobě prototypu krytu tachometru sehrál v procesu výroby jen zhruba poloviční úlohu, avšak při reálné zakázce na přípravu malé série tohoto výrobku by se jednalo o první variantu výrobní technologie, která by byla zvažována. S podporou 3D skenování lze v následujících letech očekávat další růst a rozvoj těchto technologií.

Vakuové lití v kombinaci s 3D tiskem tvoří silný nástroj pro výrobu prototypové výroby plastových výrobků s vlastnostmi velice blízkými výstřikům během sériové výroby. V rámci této práce byl vyzkoušen celý proces výroby od návrhu designu, jeho vizualizaci, následnou přípravu modelu pro 3D tisk a vytvoření silikonové formy včetně vakuového lití. Rozměrové odchylky, především rotace jádra, poukázala na nedostatek v technologickém postupu, který bude při dalším odlévání odstraněn. Z důvodu vytížení dílny ve společnosti MCAE nebylo možné v potřebném termínu provádět opětovné odlévání a proto bude nový kvalitnější odlitek vyhotoven později a prezentován během obhajoby této práce.

Jedním z cílů práce bylo porovnat náklady na výrobu prototypu několika možnými metodami a vyhodnotit ekonomicky nejvýhodnější technologii. V případě vakuového lití v kombinaci s 3D tiskem jsou celkové náklady včetně výroby nástroje o 3302% nižší než celkové náklady při použití vstřikování plastu do hliníkové formy a o 317% nižší než v případě vstřikování plastu do tištěné formy technologii 3D tisku. Z toho lze usoudit, že použitá technologie v rámci této práce byla z ekonomického hlediska dobrou volbou.

Závěrem lze říci, že všechny cíle diplomové práce byly dosaženy.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

1. *A Brief History of 3D Scanning* [Online]. © Matter and Form, Inc. 2017 [cit. 2017-02-12].
Dostupné z: <https://matterandform.net/blog/a-brief-history-of-3d-scanning>
2. *Aditivní technologie – metody Rapid Prototyping* [Online]. [cit. 2017-02-12]
Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf.
3. **Raja, Venish a Fernandes, Kiran J.** *Reverse Engineering*. Londýn : Springer, 2008. str. 242. ISBN 978-1-84628-855-5.
4. *3D skener HandyProbe Next snímá data i s dotykovou sondou* [Online]. [cit. 2017-02-12].
Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf.
5. *ATOS Triple Scan* [Online]. [cit. 2017-02-15].
Dostupné z: <http://www.mcae.cz/cs/produkty/atos-triple-scan/>.
6. *Systém pro digitální radioskopii a 3D CT skenování* [Online]. © 2014, Vydavatelství Nová média, s. r. o. — Konstrukter.cz [cit. 2017-02-16].
Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2016/11/11/system-pro-digitalni-radioskopii-a-3d-ct-skenovani-rozhovor/>
7. **Kalová, I., Ing., Horák, K., Ing.** *Optické metody měření 3D objektů* [Online]. [cit. 2017-02-16].
Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap4>
8. *3D topografie trupu a zad člověka* [Online]. [cit. 2017-02-20].
Dostupné z:
http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpk/kompendium/rhbengn/sw_diagnostics_moire.php
9. **POSPÍŠÍ, P.** *3D Triangulační technika rekonstrukce objektů*. Brno, 2009. Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT Brno, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí diplomové práce Ilona Kalová.
10. **SU, H., HUANG, Q., NILOY, J. M., LI, Y., GUIBAS, L.** *Estimating image depth using shape collections* [Online]. Siggraph 2014. [cit. 2017-02-20].
Dostupné z:
http://vecg.cs.ucl.ac.uk/Projects/SmartGeometry/image_shape_net/imageShapeNet_sig14.html

11. *Interference světla, koherentní záření* [Online]. [cit. 2017-02-28].
Dostupné z: http://www.ucebnice.krynicky.cz/Fyzika/5_Optika/3_Vlnove_vlastnosti_svetla/530_2_Interference_svetla_koherentni_zareni.pdf
12. *Jak funguje interferometrický systém?* [Online]. © 2001-2017 Renishaw plc. [cit. 2017-02-28].
Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/jak-funguje-interferometricky-system--38612>
13. *Optické metody měření 3D objektů* [Online]. [cit. 2017-02-29]
Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap2.1.2>
14. **JANÁKOVÁ, I.** *Optické 3D měření* [Online]. [cit. 2017-02-29]
Dostupné z: http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/Lectures/12_Opticke_3D_mereni.pdf
15. *Mikroskopie* [Online]. [cit. 2017-03-03].
Dostupné z: <https://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/30/public/Amikroskop.pdf>
16. *The Free Beginner's Guide* [Online]. © Copyright 2017 [cit. 2017-03-10].
Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/>
17. *How DLP Sets Work* [Online]. Copyright © 2017 HowStuffWorks, a division of InfoSpace Holdings LLC [cit. 2017-03-10].
Dostupné z: <http://electronics.howstuffworks.com/dlp2.htm>
18. *Solid Ground Curing* [Online]. [cit. 2017-03-11].
Dostupné z: http://www.wikiwand.com/en/Solid_Ground_Curing
19. **ZEMAN, LUBOMÍR.** *Vstřikování plastů*. Praha : BEN, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
20. *Struktura polymerů a její vliv na vlastnosti* [Online]. [cit. 2017-03-15].
Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html>
21. *Technologie vstřikování plastů* [Online]. [cit. 2017-03-15].
Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
22. *Složení polymerů - přísady* [Online]. [cit. 2017-03-16].
Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/05.html>
23. **ANADÃO, P.** *Polymer/ Clay Nanocomposites* [Online]. © 2004–2017 IN TECH [cit. 2017-03-17].
Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/nanocomposites-new-trends-and-developments/polymer-clay-nanocomposites-concepts-researches-applications-and-trends-for-the-future>
24. *Reaktoplasty* [Online]. [cit. 2017-03-18].
Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/21.html>

25. *Polyjet for injection molding* [Online]. © 2014 Stratasys Ltd [cit. 2017-03-20].
Dostupné z:
<http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/Applications/Injection%20Molding/SYSSTAGInjectionMolding%202414%20FINAL.pdf?v=635290899138527720>
26. *Injection molding webinar* [Online]. Stratasys Ltd. © 2017 [cit. 2017-03-22]
Dostupné z: <http://www.stratasys.com/resources/webinars/injection-molding>
27. *Vstříkovací formy* [Online]. [cit. 2017-03-23]
Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c8/VS.pdf
28. *Vakuové lití* [Online]. © Copyright Materialise 2017 [cit. 2017-03-27]
Dostupné z: <http://www.materialise.cz/vakuove-liti>
29. **MAREŠ, A.** *Návrh vstříkovací formy pro zadaný plastový díl*. Zlín, 2009.
Bakalářská práce. Fakulta technologická Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, Ústav výrobní inženýrství. Vedoucí diplomové práce Michal Staněk.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

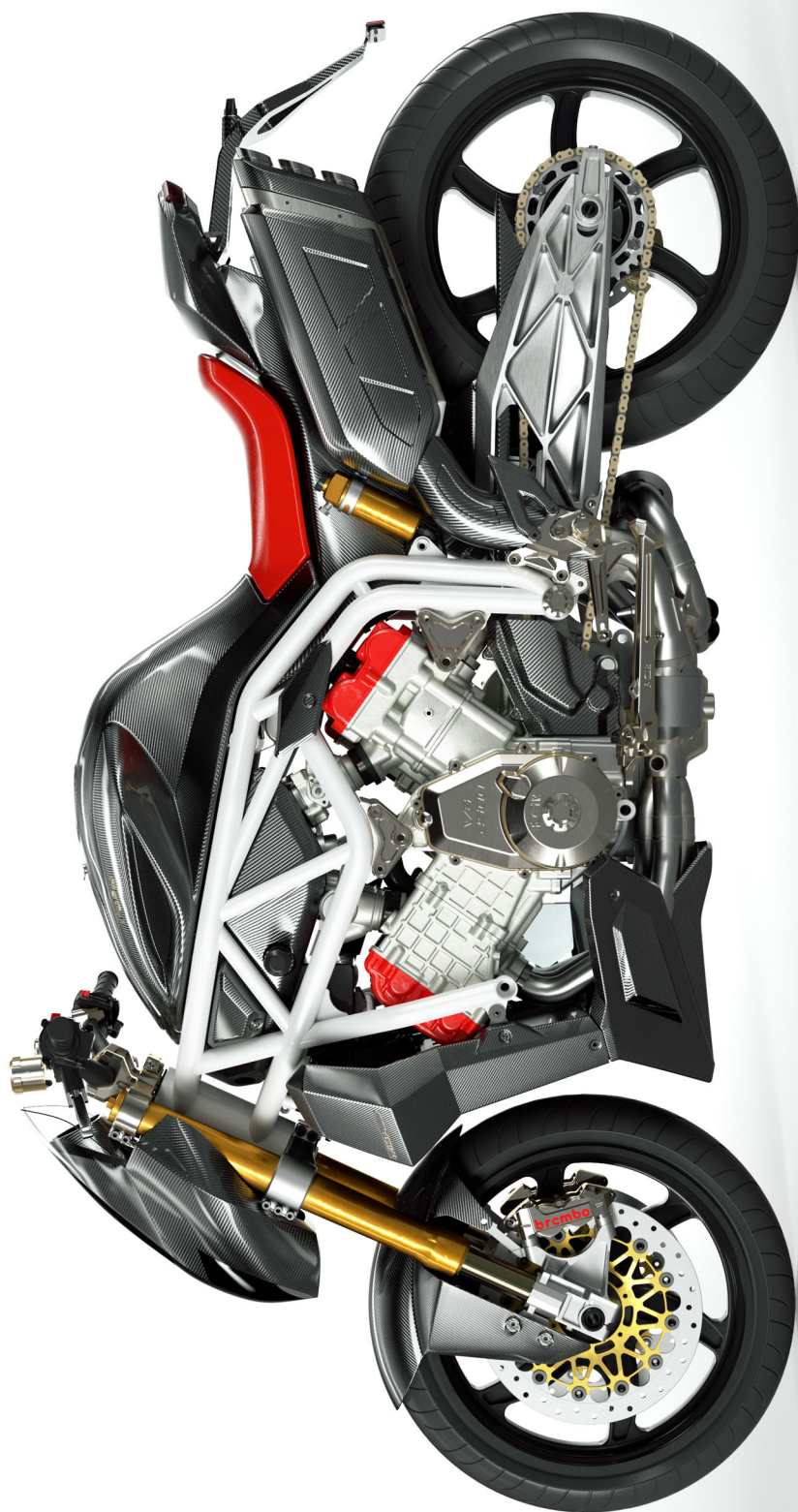
3DP	Three Dimensional Printing – prostorový tisk
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitril-Styren-Akrylát
CAD	Computer-Aided Design – počítačem podporované projektování
CCD	Charge Coupled Device – zařízení s vázanými náboji
CMM	Coordinate Measuring Machine – zařízení pro měření geometrických charakteristik těles
CT	Computed Tomography – počítačová tomografie
DLP	Digital Light Processing – technologie 3D tisku
DMD	Deformable Mirror Device – deformovatelné zrcadlové zařízení
DMLS	Direct Metal Laser Sintering – přímé kovové laserové spékání
EBM	The Electron Beam Melting – tavení elektronovým paprskem
FDM	Fused Deposition Modeling – technologie 3D tisku, modelování vytlačováním plastu
KT	Kalendářní týden
LCD	Liquid Crystal Display – displej z tekutých krystalů
LCP	Liquid Crystal Polymer – polymer se strukturou kapalných krystalů
MJM	Multi Jet Modeling – technologie 3D tisku
NURBS	Non-Uniform Rational Basis Spline – racionální bezierovy křivky s neuniformní parametrizací
PA	Polyamid
PBT	Polybutylen Tereftalát
PC	Polykarbonát
PE	Polyetylen
PES	Polyester
PET	Polyethylentereftalát
PMMA	Polymethylmethakrylát
POM	Polyoxymetylen
PP	Polypropylen
PPS	Polyfenylsulfid
PS	Polystyren
RE	Reverse Engineering – reverzní inženýrství
RP	Rapid Prototyping
SAN	Styren Acrylonitril
SB	Styren-Butadien
SBS	Styrene-Butadiene-Styrene

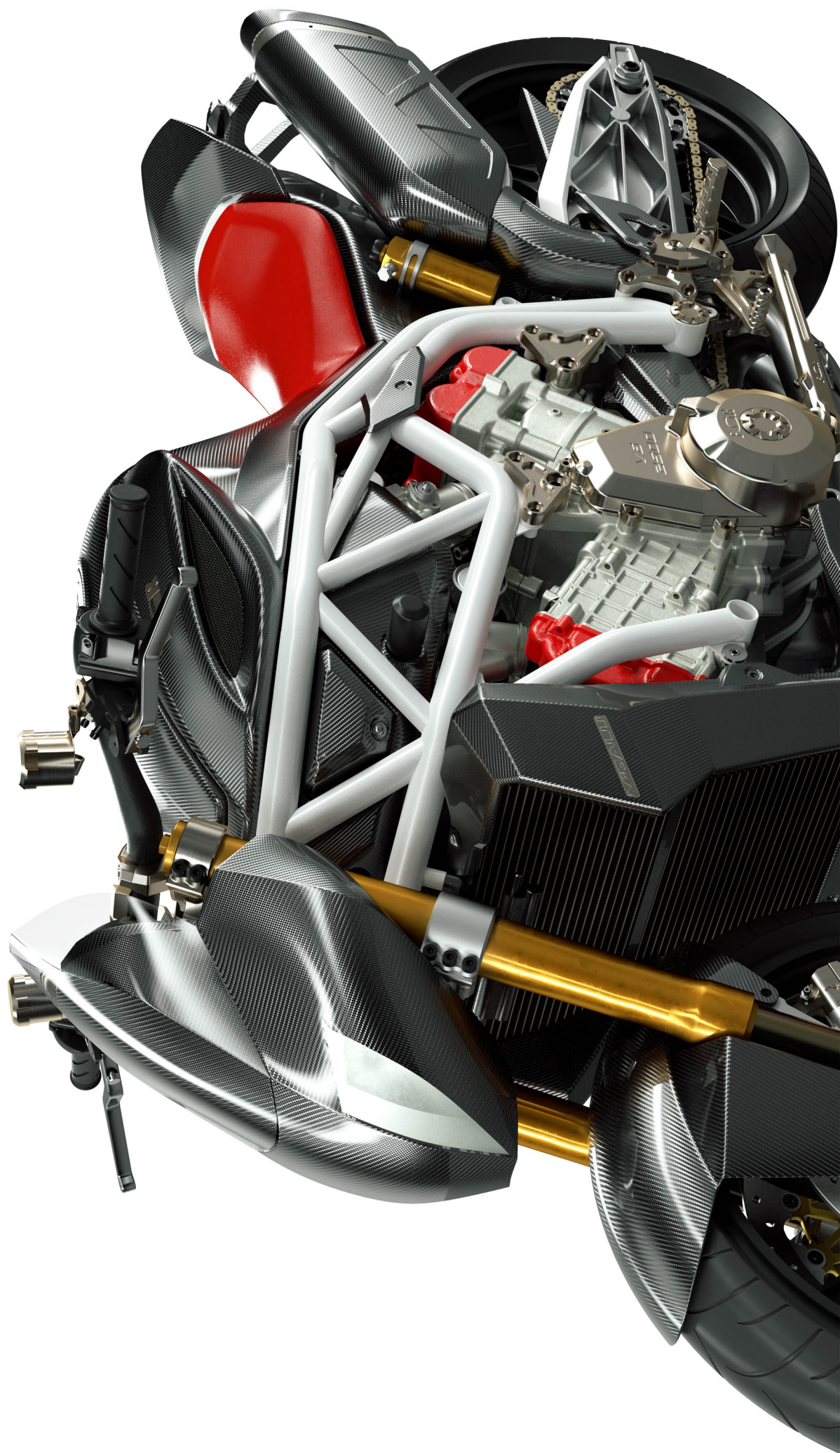
SGC	Solid Ground Curing – technologie 3D tisku
SLA, SL	Stereolithography – Stereolitografie, technologie 3D tisku
SLM	Selective Laser Melting – selektivní tavení laserem
SLS	Selective Laser Sintering – selektivní spékání laserem
STL	Stereolithography, Standard Triangle Language – standardizovaný triangulační jazyk
UV	Ultraviolet – Ultrafialové

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Vizualizace motorky a tachometru.....	I
Příloha 2: Měřicí protokol.....	II

PŘÍLOHA 1: VIZUALIZACE MOTORKY A TACHOMETRU

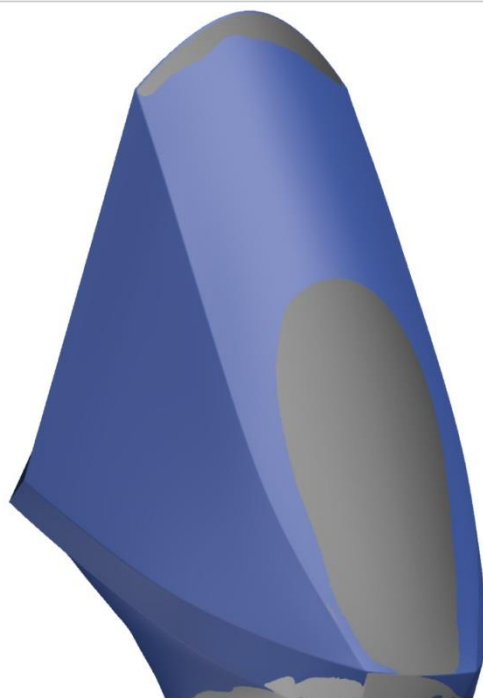




PŘÍLOHA 2: MĚŘICÍ PROTOKOL

Untitled
Prealignment

8/10



MCAE Systems, s.r.o. | mcae@mcae.cz | GOM Inspect Professional 2017-RC1 | ATOS III rev.02 Triple Scan | MV700 | 23°C |
Miele | Seitenwand | 1 | 5/26/16 | Contest |



CAD - modrá, SKEN - šedá
Prealignment

7/10



MCAE Systems, s.r.o. | mcae@mcae.cz | GOM Inspect Professional 2017-RC1 | ATOS III rev.02 Triple Scan | MV700 | 23°C |
Miele | Seitenwand | 1 | 5/26/16 | Contest |



